ENZO COPPI

IMPIANTI ELETTRICI

IL TRASFORMATORE

CRITERI DI DIMENSIONAMENTO
INSTALLAZIONE PROTEZIONE
MANUTENZIONE

HOEPLI

BARNI E., **Elettrotecnica.** Corso teorico-pratico per gli Istituti e le Scuole professionali e per i capi tecnici. 17ª ediz. riveduta dal dott. ing. *Filippo Tiberio.* 1964, in-16, di pag. 708, con 412 illustrazioni e XXXII tabelle. Copertina plastificata . . . . **L. 4000**

— **Il montatore elettricista.** Manuale per gli operai elettricisti di impianti industriali. 30ª ediz. riveduta ed aggiornata dal dott. ing. *Filippo Tiberio.* 1961, in-16, di pag. 644, con 88 tabelle e 385 figure . . . . **L. 3000**

BIASUTTI G., **Schemario di impianti elettrici.** Tutti gli impianti civili e industriali ad uso degli elettrotecnici, degli installatori, degli avvolgitori, dei progettisti, degli istituti tecnici industriali, secondo i nuovi programmi. 4ª ediz. riveduta ed aumentata. 1964, libro-atlante in-4, di pag. X-118, con oltre 100 schemi dettagliati e funzionali di facile comprensione e di pratica attuazione, in LXX tavole in nero e a colori. Copertina a colori plastificata . . . . . . **L. 3000**

Segni grafici e Norme CEI - Modalità di esecuzione e schemi unifilari di principio di impianti interni, citofoni, portiere elettrico. Illuminotecnica. Impianti per ascensori, schemi per la conversione della corrente, salvamotori, teleavviatori - Avvolgimenti a corrente continua e alternata trifase - Trattazione e schemi di protezione contro le sovratensioni, protezioni differenziali e Buchholz - Apparecchi e trasformatori di misura, schemi di quadri, di centrali, di stazioni di trasformazione e conversione.

— **Elettrotecnica sperimentale.** Visione delle più attuali teorie con speciale riguardo ai programmi ministeriali degli Istituti Tecnici Industriali. 1960, in-8, di pag. XII-208, con 203 illustrazioni . . . . **L. 1600**

Teoria elettronica - Fonti di energia - Corrente continua, suoi effetti e sue leggi fondamentali - Elettrostatica e condensatori - Magnetismo ed elettromagnetismo - Induzione elettromagnetica - Azioni meccaniche tra campi e correnti - Correnti alternate monofasi e polifasi - Campo rotante trifase.

— **Macchine elettriche.** Generalità costruttive e funzionamento di trasformatori, di macchine sincrone, asincrone, a corrente continua, speciali, e di raddrizzatori di corrente. Ad uso degli istituti tecnici industriali, secondo i nuovi programmi. Di consultazione per i Tecnici che operano nei vari settori dell'industria elettrotecnica. 1963, in-8, di pag. XX-468, con 329 illustrazioni in nero e 5 a colori. Copertina plastificata . . . . **L. 3500**

Trasformatori - Macchine sincrone - Macchine asincrone - Macchine a corrente continua - Metadinamo - Macchine a collettore monofasi e trifasi - Conversione della corrente alternata in continua.

BOSSI A. ed E. COPPI, **Misure elettriche - Prove e collaudi industriali:**

Vol. I: « Misure e prove di carattere generale ». 1961, in-8, di pag. XX-504, con 285 figure in nero ed a colori, 28 tabelle, 43 moduli di misura. Copertina a colori plastificata . . . **L. 5000**

Notizie di carattere generale - Strumenti elettrici - Apparecchiature ausiliarie, trasformatori di tensione e di corrente, generatori di Hall - Misure di tensione, corrente, potenza, energia, resistenza, induttanza, capacità - Metodi potenziometrici e di proiezione - Misure di grandezze non elettriche - Prove e collaudi industriali: prove di isolamento a frequenza industriale e a impulsi, con alte intensità di corrente a frequenza industriale e a impulsi, di riscaldamento, sui materiali magnetici, sotto pioggia.

Vol. II: « Collaudi industriali delle macchine elettriche ». 1962, in-8, di pag. XXIV-580, con 369 fig. in nero ed a colori e 32 tabelle. Copertina a colori plastificata . . . . . . **L. 6000**

Trasformatori di potenza - Autotrasformatori - Trasformatori a corrente costante - Trasformatori per mutatori - Macchine sincrone - Macchine asincrone - Macchine a corrente continua - Trasformatori di misura.

Vol. III: « Collaudi industriali delle apparecchiature per impianti elettrici ». 1964, in-8, di pag. XXVIII-612, con 373 figure e 86 tabelle. Copertina a colori plastificata . . . . **L. 8000**

Interruttori automatici per alta e bassa tensione - Protezioni selettive degli impianti - Valvole fusibili - Condensatori di rifasamento - Scaricatori a resistenza non lineare e ad espulsione - Cavi di energia isolati in carta e materiali termoplastici - Metodi per la ricerca dei guasti durante l'esercizio.

● *Una notevole parte dell'opera è stata dedicata ai generatori d'impulsi e alle prove condotte con impulsi di corrente e di tensione. Opera adatta a chi intende specializzarsi nel campo delle misure e dei collaudi* ●

— **Impianti di terra di funzionamento e di protezione,** secondo le disposizioni contenute nel D.P.R. n° 547 del 27-4-55 e fasc. 11-8-1962 delle Norme CEI. 1964, in-8, di pag. XX-280, con 162 illustrazioni e 17 tabelle. Copertina a colori plastificata . . . . **L. 4000**

BRAGG L., **Elettricità.** Traduzione italiana a cura del dott. ing. *A. Querques.* 1953, in-16, di pagine XX-316, 139 figure di cui 48 in 33 tavole fuori testo . . . . **L. 1800**

Cos'è l'elettricità - Come si muove l'elettricità - Motori e generatori - La nostra fornitura di energia elettrica - Telegrafi e telefoni - Circuiti elettrici oscillanti.

BROEDNER E. e J. WOLF, **L'elettrotecnica nei comandi e negli impianti industriali.** 1955, in-8, di pag. XVI-272, con 175 illustrazioni e 20 tabelle di cui due fuori testo (Protezione delle macchine elettriche; riassunto sinottico delle caratteristiche dei motori) . . . . . **L. 1600**

Impianti a bassa tensione - Protezione impianti elettrici - Linee e cavi a bassa tensione - Apparecchi di manovra e fusibili - Freni - Trasformatori - Convertitori - Motori a gabbia - Motori ad anelli di contatto - Motori a collettore - Motori a corrente continua - Condensatori - Miglioramento del fattore di potenza - Riscaldamento elettrico - Riscaldamento ad alta frequenza - Tariffa per la fornitura di energia elettrica - Formulario.

CASTIGLIONI G., **Insegne luminose. Tubi fluorescenti.** Tecnica di fabbricazione. 1953, in-8, di pag. XII-232, con 127 illustrazioni . . . . **L. 1600**

Materiali e loro caratteristiche - Produzione e misura delle basse pressioni - Tecnica di soffieria - Ciclo costruttivo Attrezzatura ed impianti - Collaudo e posa in opera - Tubi per illuminazione - Disposizioni legislative.

(segue all'interno di questo risvolto)

EDITORE ULRICO HOEPLI MILANO

ENZO COPPI

IMPIANTI ELETTRICI

IL TRASFORMATORE

CRITERI DI DIMENSIONAMENTO
INSTALLAZIONE, PROTEZIONE, MANUTENZIONE

173 figure e 90 tabelle

EDITORE ULRICO HOEPLI MILANO
1964

PREFAZIONE

Proseguendo nella serie dei volumi dedicati agli impianti elettrici, mi è sembrato utile riunire, in un'unica pubblicazione, quanto poteva riguardare i trasformatori, sia nei confronti del progetto di impianto, sia per quanto concerne la manutenzione di queste macchine, in modo da offrire ai tecnici una larga visione del problema inerente i trasformatori di media e piccola potenza, destinati alle cabine di trasformazione degli impianti industriali e delle reti di distribuzione.

La prima parte, dedicata al collaudo dei trasformatori, vuole offrire in modo indicativo, al tecnico che assiste alle prove, le informazioni di carattere generale atte a facilitarne la comprensione.

Nella seconda parte sono riuniti i criteri di dimensionamento delle macchine nei confronti della potenza degli utilizzatori installati, i criteri di installazione e di protezione.

A tutta prima potrebbe sembrare che i problemi relativi alla installazione esulassero dalle necessità del progettista, ma averli inseriti ha permesso di fornire al lettore la possibilità di rilevarne l'importanza, ai fini della parte pratica di previsione degli accessi al locale cabina.

La manutenzione dei trasformatori e la ricerca dei guasti, formano con questa, la parte dedicata, in special modo, agli operatori addetti alla conduzione degli impianti.

Negli ultimi capitoli è stato dato ampio risalto al problema delle protezioni antincendio, mettendo in rilievo la consistenza degli impianti automatici non eccessivamente conosciuta, e le precauzioni da usare quando occorra intervenire su macchine isolate con liquidi sintetici ininfiammabili.

Spero con questa opera di avere utilmente riunito una vasta serie di nozioni relative ai trasformatori, che potranno essere di notevole aiuto per tutti quelli che per le prime volte si accingono a risolvere i problemi che si pongono quando occorre dimensionare, installare e proteggere queste macchine.

E. COPPI

INDICE DELLA MATERIA

PARTE PRIMA

IL TRASFORMATORE DI POTENZA SECONDO LE NORME CEI

PARTE SECONDA

CRITERI DI DIMENSIONAMENTO, D'INSTALLAZIONE E DI PROTEZIONE DEI TRASFORMATORI

PARTE TERZA

MANUTENZIONE E CONDUZIONE DEI TRASFORMATORI

PARTE QUARTA

I CIRCUITI AUSILIARI E I CIRCUITI DI TERRA

PARTE QUINTA
IMPIANTI ANTINCENDIO

INDICE DELLE TABELLE

BIBLIOGRAFIA

ANIDEL: *Capitolato per l'ordinazione dei trasformatori.*

BLUME: *Transformer engineering.*

BOSSI A. e COPPI E.: *La protezione dei trasformatori installati nelle reti di distribuzione dalle sovratensioni d'origine atmosferica.* « Rivista Industria Italiana Elettrotecnica ».

BOSSI A. e COPPI E.: *Misure elettriche e collaudi industriali.*

CEI: *Norme per trasformatori reattori : variatori a induzione.*

CEI: *Norme per i trasformatori di misura.*

COMP. GENERALE D'ELETTRICITÀ: « Bollettino tecnico », n. 1148.

COPPI E.: *Dispositivi di raccolta e spegnimento dell'olio per trasformatori di potenza.* « Rivista Elettrificazione ».

COPPI E.: *La tecnica elettrica I e III volume.*

COPPI E.: *Estintori d'incendio.* « Rivista Elettrificazione ».

DU PONT: *Freon FE 1301 fire extinguishing agent.*

FABRIZI O.: *Le protezioni selettive.*

LAPINE: *Les essais des transformateurs.*

Rappel des equations générales regissant les phénoménes thermiques du transformateur, « Rivista Acec ».

Transformer temperatures Graphically. « Electrical World ». *It's simple to overload transformers sapely it you know how.* « Transformer reference book (Allys Chamlers) ».

PARTE PRIMA

IL TRASFORMATORE DI POTENZA SECONDO LE NORME CEI

CAPITOLO I

DEFINIZIONI

Il trasformatore è una macchina statica a induzione che trasforma la potenza elettrica modificandone i fattori di tensione e di corrente.

In essa gli avvolgimenti, in numero di due o più, sono fissi l'uno rispetto all'altro, elettricamente separati, e sono inseriti in derivazione ciascuno sulla rete corrispondente.

È questa la definizione generica di trasformatore specificata nel fascicolo 78 delle Norme CEI.

L'avvento della energia elettrica di tipo alternato e la possibilità di generalizzare il suo uso, si può dire siano dovuti a questa macchina che modificando, a volontà, i parametri fondamentali delle grandezze che formano la potenza ha permesso il trasporto economico dell'energia anche a distanze notevoli.

La classificazione dei trasformatori, in relazione al tipo costruttivo e al sistema di raffreddamento, ammette due grandi divisioni:

— macchine a secco (fig. 1);
— macchine in olio o altro liquido isolante (fig. 2).

Si definiscono « macchine a secco » quelle nelle quali le parti attive non sono immerse in un dielettrico liquido. Queste macchine possono essere raffreddate con ventilazione sia naturale che forzata e la loro installazione deve, in ogni caso, avvenire in ambienti chiusi o comunque protetti dall'umidità e dalla pioggia.

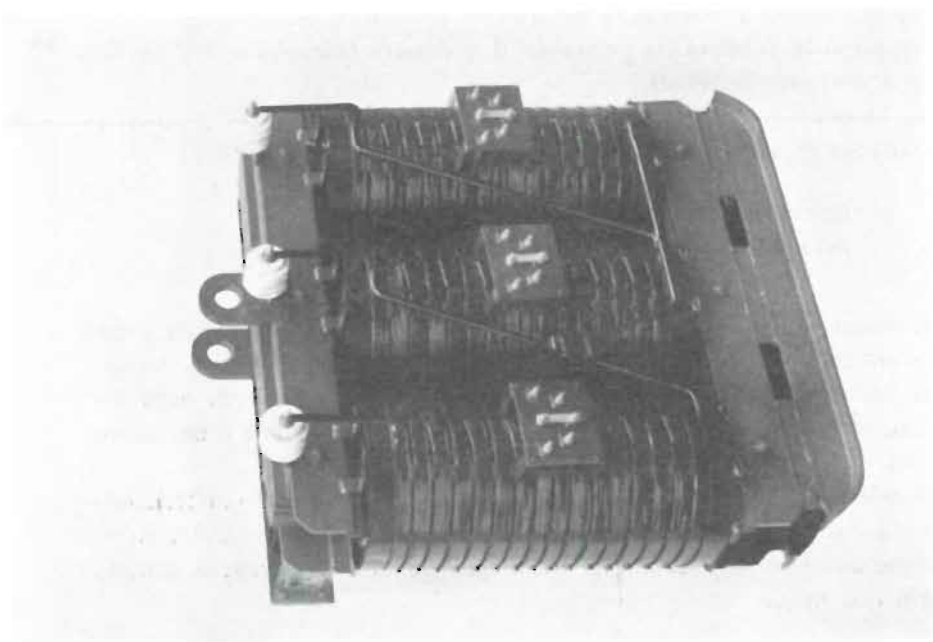
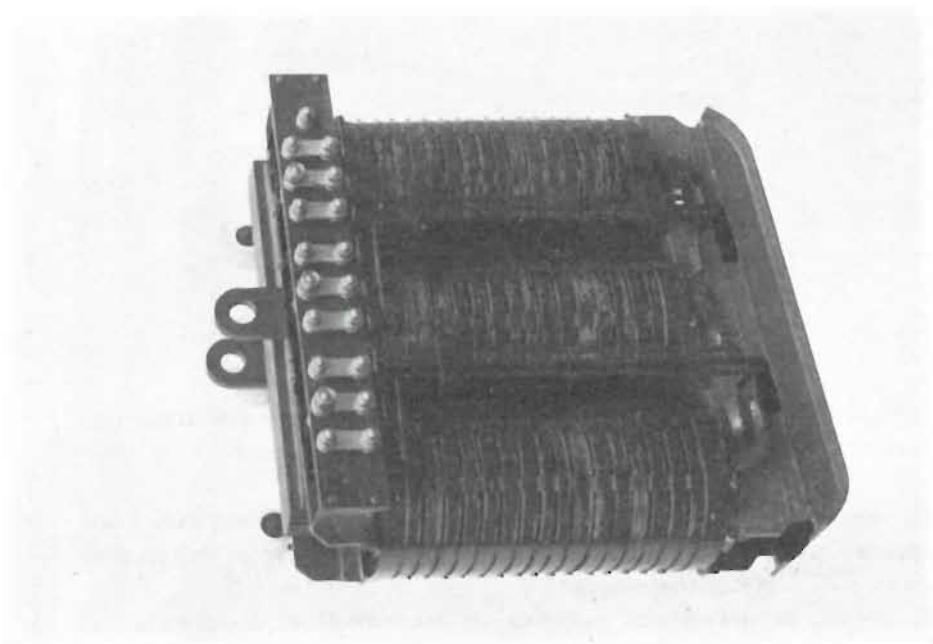
Si definiscono « macchine in olio o in altro tipo di liquido dielettrico », quelle le cui parti attive sono immerse in un dielettrico liquido. Il raffreddamento può avvenire con aria (ventilazione naturale o forzata) oppure con acqua.

a

b

Fig. 1 – Trasformatore « a secco » isolato in aria a raffreddamento naturale (Tamini): *a*) vista dei morsetti d'alimentazione a M T e del variatore di tensione; *b*) vista dei morsetti d'uscita a bassa tensione.

Nel caso in cui il raffreddamento avvenga in appositi organi refrigeranti, la circolazione del liquido di raffreddamento può essere naturale o forzata.

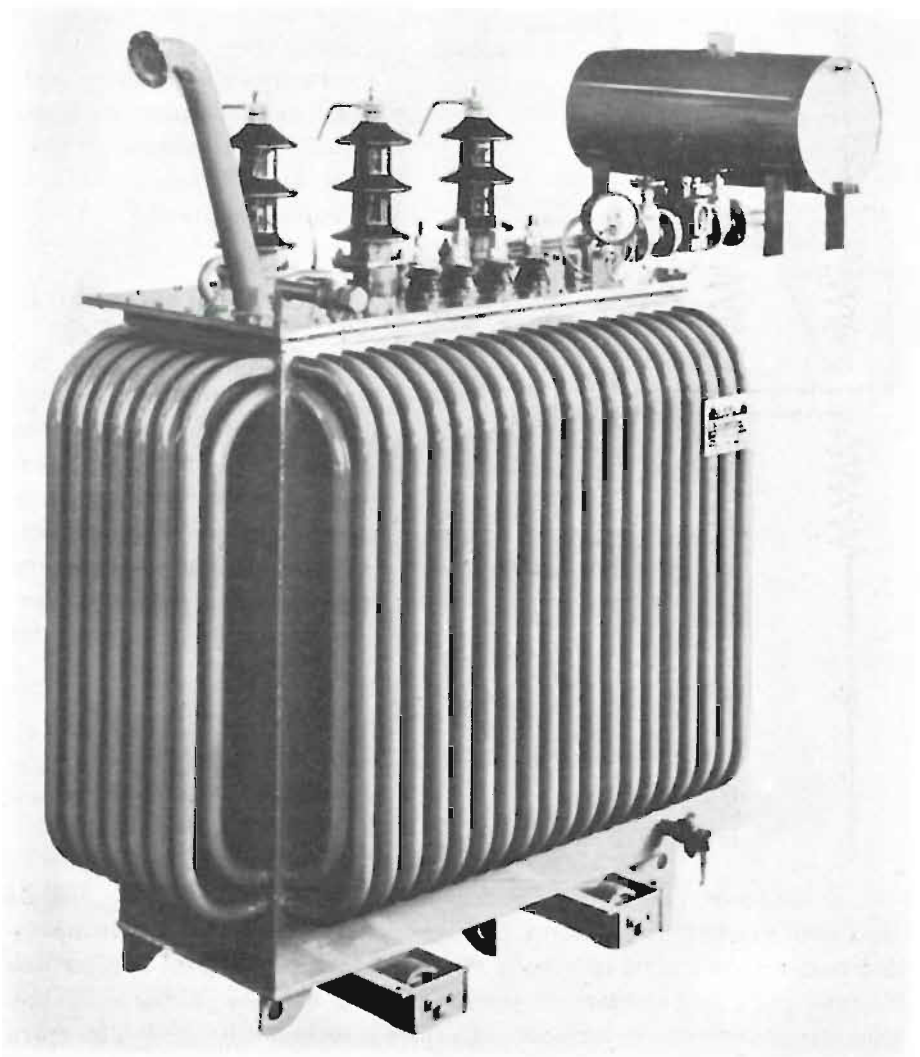
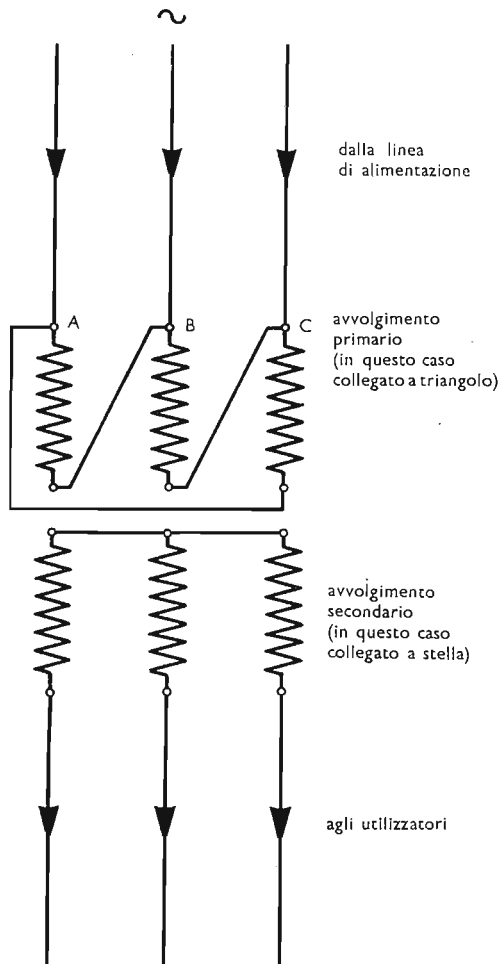



Fig. 2 – Trasformatore in olio o altro liquido isolante a raffreddamento naturale (TRAFO).

Questo tipo di macchina può essere costruito per installazione sia all'interno che all'esterno.

Dalla classificazione fatta secondo il tipo costruttivo riteniamo necessario esporre, per sommi capi, la definizione dei termini che normalmente vengono usati per queste macchine e dei quali gli installatori e i progettisti devono conoscere l'esatto significato.

Primario e secondario

Qualunque sia l'uso che si fa di un trasformatore, quando viene inserito in un circuito elettrico, si chiamano primari i circuiti che ricevono la potenza elettrica, e secondari quelli che erogano la potenza verso gli apparecchi utilizzatori (fig. 3).

Fig. 3 – Schema dimostrativo della definizione di primario e secondario.

È evidente che essendo il trasformatore una macchina reversibile la denominazione di primario e di secondario può essere applicata indifferentemente a ciascun avvolgimento, in quanto, qualora la macchina funzioni come abbassatore di tensione, verrà definito primario l'avvolgimento alimentato a tensione superiore e secondario quello che eroga una tensione inferiore, mentre, quando il trasformatore venga usato come elevatore di tensione, si chiamerà avvolgimento primario quello nel quale agisce il valore di tensione minore, e secondario quello che eroga un maggior valore di tensione.

Alta tensione, tensioni intermedie, bassa tensione

Parlando di un trasformatore le definizioni di alta tensione, bassa tensione ecc., non si riferiscono alla dizione simile usata per gli impianti elettrici, ma hanno soltanto un valore relativo e stanno a indicare i valori delle tensioni misurabili ai morsetti della macchina, espresse in ordine decrescente, qualunque sia il loro effettivo valore.

Dati nominali

Si definiscono dati nominali di un trasformatore i valori delle grandezze che servono a inquadrarne compiutamente la prestazione, sia agli effetti dell'ordinazione che del collaudo.

Sono da considerare come dati nominali quelli riferiti alle seguenti grandezze:

— potenza (apparente) della macchina o eventualmente di ciascun avvolgimento;
— la frequenza;
— la tensione e la corrente di ciascun avvolgimento riferite ai morsetti terminali di esso.

In particolare avremo:

Potenza nominale di un avvolgimento.

Si definisce potenza nominale di un avvolgimento, il prodotto ottenuto moltiplicando il valore della tensione nominale per la corrente nominale, riferite ai morsetti terminali dell'avvolgimento stesso.

Quando la potenza nominale debba essere espressa per macchine polifasi, il prodotto così ottenuto deve essere moltiplicato per il fattore di fase ($\sqrt{3}$ per i sistemi trifase ecc.).

La potenza nominale si esprime in voltampere (VA) o in chilovoltampere (kVA).

Frequenza nominale.

È il valore della frequenza di funzionamento (specificato dal committente); tale valore deve essere considerato come l'unico agli effetti delle garanzie e del collaudo.

Tensione nominale primaria.

Ricordando quanto abbiamo detto a proposito delle denominazioni di primario e secondario, si definisce tensione nominale primaria quella specificata dal committente della macchina e riferita alla presa principale quando, come vedremo, nella macchina esistano possibilità di adeguamento alla tensione effettiva della rete.

Tensione nominale secondaria.

Si definisce tensione nominale secondaria il valore di tensione misurabile ai morsetti dell'avvolgimento secondario, quando l'avvolgimento primario sia alimentato alla propria tensione nominale.

Occorre fare molta attenzione a questo valore, in quanto esso deve intendersi « a vuoto » per trasformatori a due o più avvolgimenti, per gli autotrasformatori, per i trasformatori variatori di fase, ecc., mentre deve intendersi « a pieno carico » quando venga riferito a trasformatori serie e a trasformatori a corrente costante.

Corrente nominale di un avvolgimento.

Si definisce « corrente nominale » il valore della corrente assorbibile od erogabile nei termini della potenza nominale.

Il valore della corrente nominale è quello al quale si deve fare riferimento agli effetti delle garanzie e del collaudo.

Fattore di potenza.

Si definisce fattore di potenza il valore risultante dalla seguente relazione:

$$\cos\varphi = \cos \text{arc tang} \frac{\Sigma \text{ potenze reattive}}{\Sigma \text{ potenze attive}}$$

Nel carico monofase o trifase equilibrato e per tensione e corrente praticamente sinusoidale, il valore del fattore di potenza può anche essere espresso dal rapporto fra la potenza attiva e la potenza apparente, secondo la relazione

$$\cos\varphi = \frac{VI\cos\varphi}{VI} \quad \text{per carico monofase}$$

$$\cos\varphi = \frac{\sqrt{3}\,VI\cos\varphi}{\sqrt{3}\,VI} \quad \text{per carichi trifase equilibrati}$$

Tutti i dati di tensione e di corrente devono essere espressi in valore efficace.

Per le macchine trifase il valore delle tensioni da indicare è quello concatenato (tra fase e fase) fatta eccezione per i trasformatori per mutatori per i quali si deve indicare il valore della tensione tra fase e neutro.

Tipi di servizio

Prima di passare alla trattazione particolareggiata delle macchine destinate alle cabine di trasformazione, argomento del volume, vogliamo indicare, in via del tutto generale, i tipi di servizio per i quali i trasformatori possono essere costruiti.

Essi sono:

— servizio continuo;
— servizio di durata limitata;
— servizio intermittente.

Quando si dice che un trasformatore è costruito per « servizio continuo » vuole significare che la macchina è adatta a funzionare alla sua potenza nominale per un tempo illimitato.

È questo il tipo di trasformatore che verrà considerato in tutta la trattazione. Sulla targa delle macchine aventi tale caratteristica deve essere riportata la sigla

« S. C. »

Quando si dice che un trasformatore è costruito per un servizio di durata limitata, vuol dire che la macchina può funzionare alla potenza nominale solo per un periodo di tempo convenuto, dopo il quale deve seguire un intervallo di tempo in cui la macchina resta alimentata a vuoto.

L'intervallo di tempo fra due successivi periodi di lavoro, deve avere un valore sufficiente affinchè la macchina possa riportarsi alla temperatura ambiente.

Sulla targa delle macchine aventi questa caratteristica deve essere riportata la sigla

« S. L. »

Secondo le Norme CEI sono da considerare normali le durate in servizio di 10, 30, 60, 90 minuti.

Quando si dice che un trasformatore è costruito per servizio intermittente, significa che la macchina può essere sottoposta, ciclicamente, a periodi di lavoro alla potenza nominale, e a successivi periodi senza tensione di alimentazione o di funzionamento a vuoto.

Nel primo caso, periodo di riposo senza tensione di alimentazione, sulla targa della macchina deve essere riportata la sigla

« S. I. R. »

mentre nel secondo caso la sigla diviene

« S. I. F. »

Questo tipo di servizio è caratterizzato dal rapporto fra la durata del periodo di lavoro e la durata totale del ciclo, detto « rapporto d'intermittenza »; quando si ritiene necessario dovranno essere indicati i cicli orari.

Secondo le Norme CEI si considerano come normali i valori del rapporto d'intermittenza del 15, 25, 40%, in ogni modo la durata del lavoro non deve superare i 10 minuti.

CAPITOLO II

COLLEGAMENTI INTERNI DEI TRASFORMATORI TRIFASE A DUE AVVOLGIMENTI

Esaminata la parte generale, comune a tutti i trasformatori, iniziamo un esame particolareggiato dei trasformatori trifase a due avvolgimenti che costituiscono l'assoluta maggioranza delle macchine usate negli impianti elettrici.

Essendo il volume dedicato ai progettisti e agli installatori d'impianti, riteniamo inutile trattare la parte che riguarda la costruzione delle macchine, un problema che esula completamente dai compiti che le due categorie summenzionate devono assolvere, in quanto per essi è sufficiente avere una chiara spiegazione dei criteri di dimensionamento, e dei particolari che occorre citare nella richiesta d'offerta.

Vedremo inoltre, nel corso della trattazione, come si esaminano le offerte ricevute e come si esegue il collaudo del trasformatore, onde accertarsi che la macchina corrisponda perfettamente ai dati espressi nell'ordine.

Iniziamo prendendo in esame i collegamenti interni dei trasformatori trifase, per i quali le Norme CEI indicano quattro gruppi. Nella tabella I riportiamo gli schemi relativi.

Le Norme CEI raccomandano come schemi normali quelli compresi nei gruppi 0 e 11.

Tabella N. 1 – Schemi di collegament

Per la migliore comprensione della tabella richiamiamo quanto in proposito è fatto presente nelle norme CEI 14-1 (art. 1.5.01):

1) le lettere maiuscole si riferiscono ai morsetti dell'alta tensione, le minuscole a quelli della bassa, qualunque sia la funzione degli avvolgimenti (primari o secondari);

2) nei diagrammi vettoriali sono rappresentate le f.e.m. indotte negli avvolgimenti dell'alta e della bassa tensione, con i corrispondenti spostamenti di fase: lo spostamento angolare risultante fra l'alta e la bassa tensione è quello che si verifica fra le due rette passanti l'una per il punto *A* e il centro del diagramma relativo all'alta tensione, l'altra per il punto *a* e il centro del diagr. di bassa tensione;

3) gli spostamenti angolari indicati sono ritardi della bassa rispetto all'alta tensione, quando il senso ciclico delle fasi sia quello *A B C*.

Invertendo il senso ciclico delle tensioni rispetto alla successione dei morsetti, gli spostamenti angolari rimangono invariati in valore, ma diventano anticipi della bassa rispetto all'alta tensione.

Per ottenere che la bassa tensione anticipi rispetto all'alta, man-

	RAPPRESENT. SCHEMATICA		SCHEMA COLLEGAMENTI		
	LATO A.T	LATO BT	LATO A.T	LATO B.T	
GRUPPO 0 SPOSTAMENTO ANGOLARE 0°	B A C	b a c	A B C	a b c	Dd 0
	B A C	b a c	A B C	a b c	Yy 0
	B A C	b a c	A B C	a b c	Dz 0
GRUPPO 11 SPOSTAMENTO ANGOLARE 330°	B A C	b c a	A B C	a b c	Dy11
	B A C	b c a	A B C	a b c	Yd 11
	B A C	b c a	A B C	a b c	Yz 11

tenendo il senso ciclico *A B C*, è necessario rovesciare i collegamenti interni nell'esecuzione del triangolo e dello zig-zag (ribaltare lo schema intorno ad un asse verticale, adagiato lungo la fase *B*);

4) gli schemi che dànno luogo a uno stesso spostamento angolare sono riuniti in un medesimo gruppo: la numerazione dei gruppi si ottiene dividendo per 30 lo spostamento angolare.

(Questo sistema di numerazione corrisponde a leggere gli spostamenti angolari su un quadrante di orologio;

5) gli schemi di collegamento rappresentano gli avvolgimenti come sarebbero visti da un osservatore situato dalla parte dei morsetti di alta tensione;

6) tutti i diagrammi vettoriali sono tracciati supponendo gli avvolgimenti di alta e di bassa tensione avvolti nel medesimo senso (ambedue a spirale destrorsa o ambedue a spirale sinistrorsa);

7) per la denominazione convenzionale degli schemi si scrivono successivamente le lettere rappresentative del tipo di collegamento dell'alta e della bassa tensione, seguite dal numero del gruppo. Si usa *D* per il triangolo, *Y* per la stella, *Z* per lo zig-zag.

	RAPPRESENT. SCHEMATICA		SCHEMA COLLEGAMENTI		
	LATO A.T.	LATO B.T.	LATO A.T.	LATO B.T.	
GRUPPO 6 SPOSTAMENTO ANGOLARE 180°	B A C	c a b	A B C	a b c	Dd 6
	B A C	c a b	A B C	a b c	Yy6
	B A C	c a b	A B C	a b c	Dz6
GRUPPO 5 SPOSTAMENTO ANGOLARE 150°	B A C	a c b	A B C	a b c	Dy5
	B A C	a c b	A B C	a b c	Yd5
	B A C	a c b	A B C	a b c	Yz 5

CAPITOLO III

PARTICOLARI RIGUARDANTI I DATI RIPORTATI NELLA TARGA DEI TRASFORMATORI TRIFASE A DUE AVVOLGIMENTI

Ogni trasformatore deve essere corredato da una targa, nella quale, secondo le indicazioni riportate negli articoli delle Norme CEI per i trasformatori (fascicolo n. 78), devono essere espressi tutti i valori atti a identificarne correttamente la prestazione e i particolari costruttivi.

È assolutamente necessario che ogni tecnico progettista e installatore sappia interpretare con sicurezza i dati contenuti nella targa di una macchina, poichè, dalla conoscenza esatta del loro significato dipende in definitiva il corretto uso del trasformatore.

Nella fig. 4 abbiamo riportato un esempio di targa compilata secondo i dettami espressi nelle Norme CEI 1953 e sulla quale possono essere individuati i seguenti dati:

1) il nome della ditta costruttrice, affiancato dalla sigla CEI 1953, che esprime a quale gruppo di Norme siano da riferirsi i dati esposti;

2) numero della macchina, numero progressivo dato dal fabbricante e che serve a distinguerla da altre macchine;

3) anno di fabbricazione;

4) *tipo*: sigla apposta dal costruttore che serve a distinguere le macchine da altre aventi caratteristiche di prestazione diverse;

5) *potenza*: espressa in chilovoltampere (kVA), corrisponde alla potenza *assorbita* dalla macchina quando, ai morsetti secondari, venga erogata l'intensità di corrente indicata nella targa;

6) *frequenza*: espressa in numero di periodi al secondo (p/s);

7) *servizio*: può essere « continuo » o discontinuo. Il primo caso vuole indicare che la macchina ha le dimensioni sufficienti per erogare, per un tempo indefinito, il valore dell'intensità di corrente indicato nella targa, senza oltrepassare i limiti di temperatura stabiliti dalle Norme.

Nel caso di servizio discontinuo la macchina può sopportare sovraccarichi tanto maggiori quanto più lunghi sono gli intervalli di riposo e quanto più brevi sono i tempi di lavoro.

Fig. 4 - Esempio di targa per trasformatore trifase a due avvolgimenti compilata secondo le Norme CEI 1953.

Per macchine costruite per un servizio di questo genere la targa deve portare chiaramente indicate le possibilità del trasformatore sia come potenza, come tempo di impiego, che come intervallo di tempo necessario fra due periodi consecutivi di lavoro (vedere a pag. 9);

8) *tensione nominale primaria*: il valore indicato corrisponde alla tensione media relativa al circuito alimentatore;

9) *corrente primaria*: indica il valore dell'intensità di corrente che circola nell'avvolgimento primario quando la macchina è alimentata con il valore medio della tensione nominale primaria ed eroga, ai morsetti secondari, il valore d'intensità di corrente indicato nella targa sotto la voce « corrente secondaria »;

10) *tensione nominale secondaria*: valore di tensione rilevabile ai morsetti secondari, quando la macchina è alimentata con il valore nominale di tensione primaria, senza che nessuna corrente venga erogata dai morsetti secondari. Tale valore viene definito « tensione a vuoto » e differisce dalla « tensione a carico » per la caduta di tensione caratteristica della macchina;

11) *corrente secondaria*: valore dell'intensità di corrente erogabile ai morsetti secondari. Questo valore, moltiplicato per il valore della tensione nominale secondaria e per la radice quadrata di tre (1,732) secondo la nota relazione:

$$P = \sqrt{3}\, V\, I$$

fornisce il valore della *potenza assorbita* dalla macchina. Questo valore è puramente indicativo, ai fini dei limiti funzionali, perchè, evidentemente non possono coesistere e quindi essere confrontati, i valori di tensione a vuoto e di intensità massima di corrente a pieno carico;

12) *prese primarie*: variazioni della tensione applicata che la macchina è predisposta a ricevere senza che in corrispondenza di questi vari il valore della tensione ai morsetti secondari;

13) *correnti*: valori d'intensità di corrente circolanti nell'avvolgimento primario, in corrispondenza alle varie tensioni applicabili alla macchina;

14) *collegamenti primari*: indica il modo con il quale sono stati realizzati i collegamenti interni fra gli avvolgimenti di fase relativamente all'avvolgimento primario;

15) *collegamenti secondari*: indica il modo con il quale sono stati realizzati i collegamenti interni fra gli avvolgimenti di fase relativamente all'avvolgimento secondario;

16) *gruppo*: si riferisce a quanto stabilito dalle Norme CEI ossia allo spostamento angolare fra le tensioni primarie e secondarie:

0 corrisponde a	0°		6 corrisponde a	180°
5 »	» 150°		11 »	» 330°

(per i collegamenti e i gruppi vedere tabella 1 a pag. 12);

17) *tensione nominale d'isolamento*: è espressa in chilovolt (kV) e indica il valore della tensione alla quale la macchina può essere sottoposta in modo graduale, per un minuto primo, allo scopo di eseguire la prova di isolamento. Salvo casi particolari, il valore non viene indicato in quanto è stabilito in modo generale dalle Norme CEI in « due volte la tensione nominale più mille volt » per macchine di nuova costruzione; per macchine aventi una certa anzianità di funzionamento, quando sia necessario ripetere la prova, i valori indicati devono essere convenientemente diminuiti;

18) *tensione di corto circuito*: è espressa in percentuale e definisce il valore della tensione che deve essere applicato ai morsetti primari

o secondari della macchina, perchè nell'altro avvolgimento, posto in corto circuito, possa circolare il valore dell'intensità di corrente indicato nella targa, relativamente all'avvolgimento considerato;

19) *pesi*: sotto questa voce sono riportati i pesi delle varie parti che compongono il trasformatore, ossia l'olio e l'estraibile, che comprende gli avvolgimenti, il nucleo, il coperchio, gli isolatori, ecc. Viene poi indicato il peso totale, quindi il peso della cassa può ottenersi per differenza.

DATI DI TARGA PER MACCHINE DI TRASFORMAZIONE DI VARIA NATURA

A titolo puramente informativo riportiamo l'elencazione dei dati che devono essere riportati sulla targa relativa a macchine trasformatrici di potenza aventi funzioni diverse da quelle alle quali il volume si riferisce. Esse sono:

— autotrasformatore;
— trasformatore a più avvolgimenti;
— trasformatore serie;
— trasformatore autoregolatore a corrente secondaria costante;
— trasformatore survoltore o devoltore (variatore di tensione o di fase);
— reattore.

Autotrasformatore

Si definisce « autotrasformatore » una macchina elettrica statica simile al trasformatore, i cui avvolgimenti, fissi l'uno rispetto all'altro, sono metallicamente collegati fra loro e nella quale uno dei due avvolgimenti è percorso dalla risultante delle correnti primaria e secondaria (fig. 5).

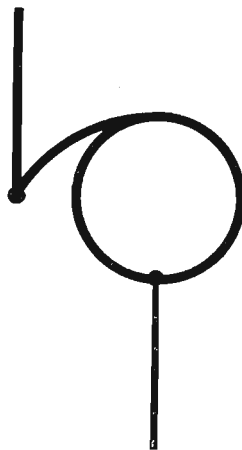



Fig. 5 – Simbolo con il quale si rappresenta un autotrasformatore.

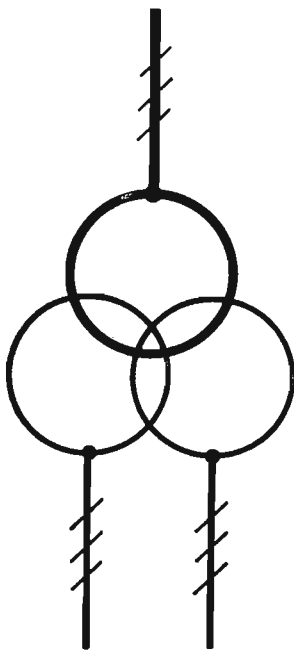
La targa di questa macchina ripete le stesse voci già elencate per il trasformatore a due avvolgimenti.

Trasformatore a più avvolgimenti

Quando un trasformatore è costruito con più di due avvolgimenti, (fig. 6) nella targa devono essere riportati i seguenti dati:

— tipo della macchina;
— valore della frequenza nominale;
— numero delle fasi;
— valore della potenza nominale di ciascuno degli avvolgimenti;
— valore della tensione nominale di ciascuno degli avvolgimenti. Per quelli considerati come secondari il valore della tensione nominale deve essere espresso a vuoto.

Fig. 6 – Simbolo con il quale si rappresenta un trasformatore a più avvolgimenti.

— valore della corrente nominale di ciascuno degli avvolgimenti;
— eventuali valori di tensione e di corrente possibili in corrispondenza delle singole prese;
— tipo di servizio;
— condizioni limite di caricabilità (contemporanea o meno dei singoli avvolgimenti);
— valori delle tensioni di corto circuito binario (riguardanti cioè due soli avvolgimenti) relativi a tutte le coppie possibili di avvolgimenti, rilevate al collaudo sulla presa principale, riportati a 75 °C, espressi in percento della tensione nominale e riferiti ad un'unica potenza il valore della quale deve essere specificato;
— valori dei fattori di potenza in corto circuito, corrispondenti alle singole tensioni di corto circuito binario.

Per i trasformatori trifase si deve indicare nella targa il modo di connessione degli avvolgimenti e per quelli monofase, la polarità [1].

---

[1] *Polarità dei trasformatori monofase a due avvolgimenti* (Norme CEI, fasc. 78). Se le tensioni indotte nei due avvolgimenti sono in concordanza di fase la polarità del trasformatore si definisce come « sottrattiva », se in opposizione come « additiva ».

Nella targa dovranno eventualmente essere indicati i valori delle tensioni d'isolamento.

Trasformatore serie

Si definisce « trasformatore serie » la macchina nella quale gli avvolgimenti sono fissi uno rispetto all'altro, elettricamente separati e ognuno di essi è destinato ad essere collegato in serie sulla rete corrispondente (fig. 7).

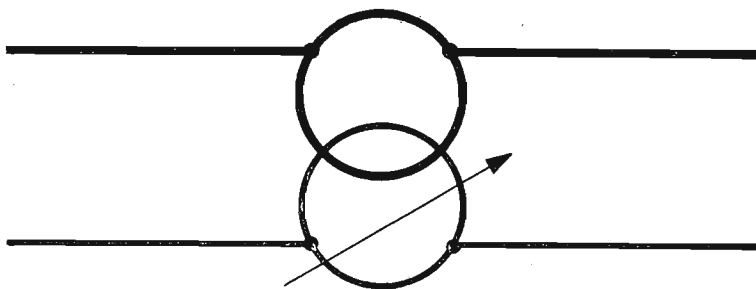



Fig. 7 – Simbolo con il quale si rappresenta un trasformatore serie.

Sulla targa dei trasformatori serie devono riportarsi i seguenti dati:

— tipo della macchina;
— valore della frequenza nominale;
— numero delle fasi;
— valore della potenza nominale;
— valore del fattore di potenza del carico;

La concordanza o l'opposizione di fase delle tensioni indotte dipende dall'ordine in cui vengono scelti e confrontati i morsetti terminali degli avvolgimenti. A questo riguardo si stabilisce la seguente convenzione:

— si applicano le lettere A B ai terminali dell'avvolgimento ad alta tensione, le lettere a b a quelli dell'avvolgimento a bassa tensione. Se le tensioni indotte fra A e B e tra a e b hanno la medesima direzione la polarità è sottrattiva, se direzioni opposte, addittiva.

Polarità dei trasformatori monofase a più avvolgimenti.

Si devono considerare in coppia con l'avvolgimento di alta tensione tutti gli avvolgimenti, e indicare, ogni volta, le corrispondenti polarità.

— valore della corrente nominale primaria;
— valore della corrente nominale secondaria;
— valore delle eventuali correnti in corrispondenza alle singole prese;
— valore della tensione nominale primaria della rete;
— valore della tensione nominale secondaria della rete;
— tipo di servizio;
— eventuali valori delle tensioni nominali d'isolamento.

Trasformatore autoregolatore a corrente costante

Si definisce così una macchina a due avvolgimenti, nella quale uno o entrambi gli avvolgimenti sono mobili, destinata ad alimentare im-

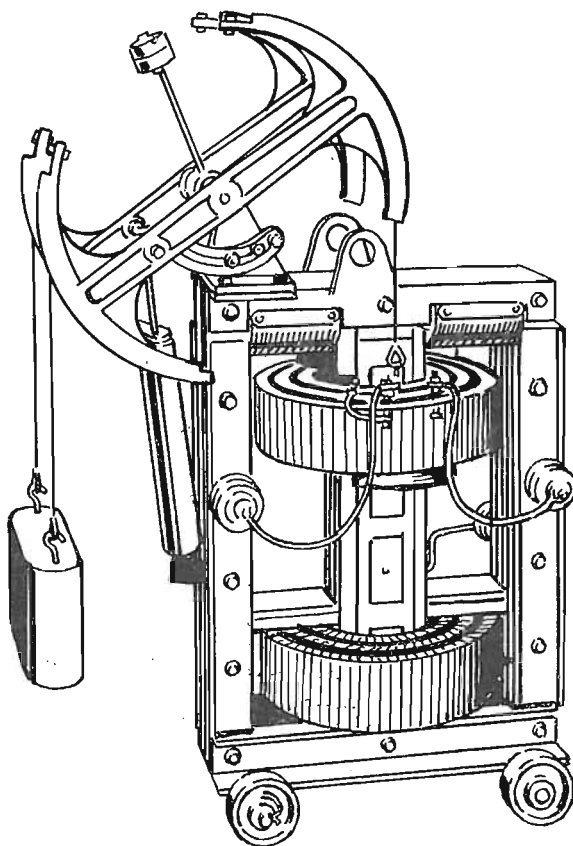



Fig. 8.
Vista esterna di un trasformatore autoregolatore a corrente costante.
(TAMINI)

pianti d'illuminazione aventi gli utilizzatori disposti in serie (figure 8 e 9).

Sulla targa dei trasformatori a corrente costante devono essere riportati i seguenti dati:

— tipo di macchina;
— valore della frequenza nominale;
— valore del fattore di potenza del carico;
— valore della tensione nominale primaria;
— valore della corrente nominale secondaria;
— valore della tensione nominale secondaria a circuito aperto;
— tipo di servizio;
— valori delle tensioni e delle correnti corrispondenti ad eventuali prese di regolazione primaria o per funzionamento a corrente ridotta, o a potenza ridotta;
— eventuali valori delle tensioni d'isolamento.

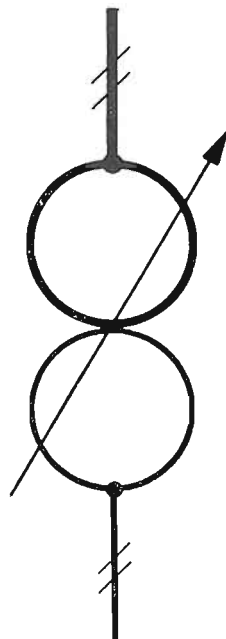
Fig. 9 – Simbolo con il quale si rappresenta un trasformatore autoregolatore a corrente costante.

Trasformatore survoltore-devoltore

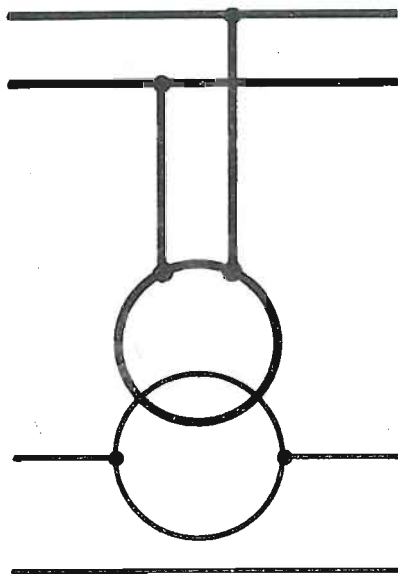
Si definisce così una macchina a due avvolgimenti, dei quali uno è connesso in derivazione e l'altro in serie sulla corrispondente rete, avente lo scopo di variare la tensione (o eventualmente anche l'angolo di fase) su questa ultima rete (fig. 10).

I due avvolgimenti, in ogni caso fissi, possono essere separati o metallicamente uniti, in questo ultimo caso la macchina prende il nome di autotrasformatore di regolazione.

Su una macchina di questo genere la targa deve essere corredata dei seguenti dati:

— tipo e modo di raffreddamento;
— valore della frequenza nominale;
— numero delle fasi;

— valore della potenza nominale riferito alla presa o alla posizione principale [1];

— valore della tensione nominale primaria e suoi limiti di variazione;

— valore della tensione nominale secondaria e suoi limiti di variazione;

— valore della corrente nominale secondaria;

— modo di connessione degli avvolgimenti;

— eventuali valori delle tensioni d'isolamento.

Per i trasformatori da usare come variatori di tensione e di fase, deve essere indicata, inoltre, l'ampiezza dei campi di variazione, sia in fase che in quadratura, rispetto alla tensione di alimentazione.

Fig. 10 – Simbolo e tipo d'inserzione di un trasformatore survoltore o devoltore.

Reattore

Si definisce reattore una macchina statica costruita con o senza nucleo magnetico, destinata a costituire una reattanza induttiva che può essere connessa in parallelo alla rete, allo scopo di assorbire una corrente in quadratura con la tensione, oppure in serie, onde provocare una caduta di tensione in quadratura con la corrente che lo percorre, o per limitare la corrente di corto circuito in un impianto. Da non con-

---

[1] Si intende come presa principale quella specificata dal committente.
In mancanza di tale specificazione, s'intende, come presa principale, quella media, se il numero totale delle prese è dispari, o quella delle due prese medie che comprende il maggior numero di spire, se il numero delle prese è pari.

fondere con i reattori che si usano per l'alimentazione delle lampade a scarica (fig. 11).

Fig. 11 – Simbolo con il quale si rappresenta un reattore.

Per una macchina di questo genere la targa relativa deve essere corredata dai seguenti dati:

— tipo della macchina;
— valore della frequenza nominale;
— numero delle fasi;
— valore della potenza nominale;
— valore della tensione nominale della rete di alimentazione;
— valore della corrente nominale;
— eventuali valori delle tensioni e delle correnti in corrispondenza alle singole prese;
— tipo di servizio.

Per i reattori trifase è necessario indicare il modo di connessione degli avvolgimenti (fasi aperte, triangolo, stella, zig-zag, ecc.).

CAPITOLO IV

PROVE DI COLLAUDO DEI TRASFORMATORI SECONDO LE NORME CEI

Le prove di collaudo dei trasformatori sono necessarie onde accertare che la macchina, una volta costruita e pronta per l'uso, risponda ai dati citati dal costruttore nella conferma d'ordine.

Mentre le Aziende distributrici dell'energia hanno Laboratori propri nei quali sono contenute le attrezzature adatte al completo collaudo delle macchine, l'installatore o il progettista di un impianto che ha commissionato, in proprio o a nome del cliente, il trasformatore che dovrà essere installato nella cabina, deve, salvo casi speciali, accontentarsi del bollettino di collaudo approntato dal costruttore, o assistere di persona all'esecuzione delle prove onde accertarsi della rispondenza dei risultati.

Quanto diremo in questo capitolo, nella maniera più sintetica, non vuole essere una spiegazione completa delle prove di collaudo che un trasformatore dovrebbe subire, ma vuole costituire un'informazione generica che potrà essere utile al progettista o all'installatore che voglia assistere di persona alle prove più significative che potrebbero essere riassunte nelle prove d'isolamento e nella determinazione delle perdite.

Quindi, mentre citeremo per sommi capi le modalità di prova di riscaldamento ecc., crediamo utile fornire spiegazioni più ampie sulle prove citate in modo da rendere accessibile la materia a chi voglia usarla al fine di rendersi conto, con una certa tranquillità, di quello che vedrà fare dai tecnici collaudatori.

Classi d'isolamento

I materiali isolanti impiegati normalmente nella costruzione dei trasformatori, nel caso specifico della copertura dei conduttori sono divisi

dalle Norme CEI in quattro classi, per le quali sono ammesse sovratemperature di diverso valore, nei confronti dei trasformatori isolati in aria (a secco) (vedi tabella 2). Le classi sono distinte con le lettere *A* - *E* - *B* - *C*.

Gli isolanti appartenenti alla classe *A* sono da considerare i seguenti:

— isolamento in cotone, seta, carta e simili materiali organici, impregnati o immersi in olio;

— isolamento in smalto (filo smaltato), di tipo oleoresinoso, immerso o no in olio, e di tipo sintetico (all'acetale di vinile, o con proprietà analoghe, immerso in olio).

Un isolamento in cotone, seta o carta, deve essere considerato « impregnato » quando una sostanza adatta sostituisce l'aria fra le fibre, anche se essa, in effetti, non riempie completamente gli interstizi liberi fra conduttori isolati. La sostanza impregnante può essere considerata adatta quando ha buone proprietà isolanti, copre interamente le fibre, e le rende aderenti l'una all'altra e al conduttore, senza che si producano discontinuità nella sua massa come conseguenza dell'evaporazione del solvente, o per qualunque altra causa. Inoltre, essa non deve essere resa fluida e non si deve deteriorare sotto l'azione prolungata delle temperature massime ammissibili.

Appartengono alla classe *E* i seguenti isolanti:

— isolante in smalto (filo smaltato) di tipo sintetico, (all'acetato di vinile o con proprietà analoghe), non immerso in olio; l'isolamento è considerato in classe *E* anche se il filo smaltato è ricoperto con carta, cotone e seta, purchè questi materiali siano impregnati.

Appartengono alla classe *B* i seguenti materiali:

— isolanti in mica, amianto, vetro o altre simili sostanze inorganiche, combinate con cementanti organici.

L'isolamento può essere considerato di classe *B*, anche se usato insieme con materiale della classe *A*, a condizione che questo venga usato come sopporto, e che la percentuale dell'isolante di classe *B* risulti non inferiore al 40%, in peso, del totale.

Sono da considerare in classe *C* i seguenti isolanti:

— mica, porcellana, vetro, quarzo o simili sostanze inorganiche, anche combinate con materiale cementante inorganico.

Per le classi *A E B* sono ammesse le seguenti sovratemperature dei conduttori:

TABELLA N. 2 – **Sovratemperature ammissibili negli avvolgimenti dei trasformatori, dell'olio, e delle superfici dei pacchi magnetici espresse in °C.**

Parti di macchine	Classi d'isolamento			
	A	*E*	*B*	*C*
Avvolgimento di trasformatore a secco	55	65	75	—
Avvolgimento di trasformatore in olio	60	—	—	—
Olio all'interno del cassone il più possibile vicino alla superficie	50			—
Superfici dei nuclei magnetici e di altre parti in contatto con l'olio o con gli avvolgimenti.	Come per gli altri avvolgimenti.			—
Tutte le parti non in contatto diretto con l'olio o con gli avvolgimenti	La temperatura di queste parti non deve in nessun caso raggiungere un valore tale che possa essere di danno ai materiali isolanti o ad altre parti che siano adiacenti.			—
	Per la classe d'isolamento *C* la sovratemperatura è limitata dalle caratteristiche dei materiali isolanti adiacenti.			

È evidente che quando si parla di sovratemperature si intende indicare il valore di temperatura raggiunto al di sopra della temperatura ambiente, in quanto il valore della sovratemperatura è dato dalla temperatura effettivamente misurata diminuita dal valore della temperatura relativa all'ambiente nel quale la macchina si trova.

È quindi importante conoscere la definizione di temperatura ambiente, nonchè quella relativa all'ambiente di riferimento.

Le Norme CEI prescrivono che, per le macchine a ventilazione naturale e per quelle a ventilazione forzata, attuata con aria proveniente dal locale nel quale la macchina è installata, si considera come valore di temperatura ambiente quello dell'aria del locale nel quale la macchina è installata. Vedremo più avanti il metodo da usare per la misura.

Per le macchine a ventilazione forzata nelle quali l'aria di ventilazione proviene da un locale diverso da quello nel quale la macchina è installata, si considera come temperatura ambiente quella dell'aria di ventilazione.

Per le macchine raffreddate con acqua si considera come temperatura ambiente quella dell'acqua entrante.

Valore della temperatura ambiente di riferimento

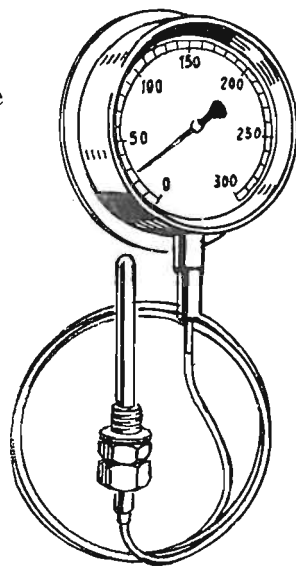
Quando si parla di limiti di sovratemperatura è naturale che occorra riferirsi ad una certa temperatura massima ambiente, onde stabilire con certezza i limiti della temperatura che può essere assunta senza pericolo dalle varie parti della macchina nelle condizioni più onerose.

Per i nostri climi le Norme CEI indicano come temperatura ambiente di riferimento per l'aria 40 °C e per l'acqua 25 °C.

Misura della temperatura ambiente

Per la misura della temperatura ambiente si possono usare termometri ad alcool, a mercurio, a resistenza o termocoppie, purchè accuratamente riparati dalle radiazioni termiche, dalle correnti d'aria, ed eventualmente dai raggi solari (figg. 12-13).

Fig. 12 – Termometro a dilatazione con sensibile ad alcool.

Fig. 13 – Termometro a dilatazione con sensibile a mercurio.

Per riparare il sensibile del termometro da eventuali correnti d'aria è consigliabile immergerlo in un pozzetto pieno di olio, questo accorgimento permette che le misure di temperatura non vengano alterate dalla diversa inerzia termica della macchina e dei termometri, dando ai pozzetti dimensioni adatte [1].

Misura della temperatura nelle macchine

La misura della temperatura raggiunta dalle macchine durante la prova può essere misurata mediante due metodi:

— metodo termometrico;
— metodo per resistenza.

Si impiega il metodo termometrico per tutti gli organi che non siano avvolgimenti, o per rilevare la temperatura raggiunta in punti particolari degli avvolgimenti, mentre il metodo per resistenza viene prefe-

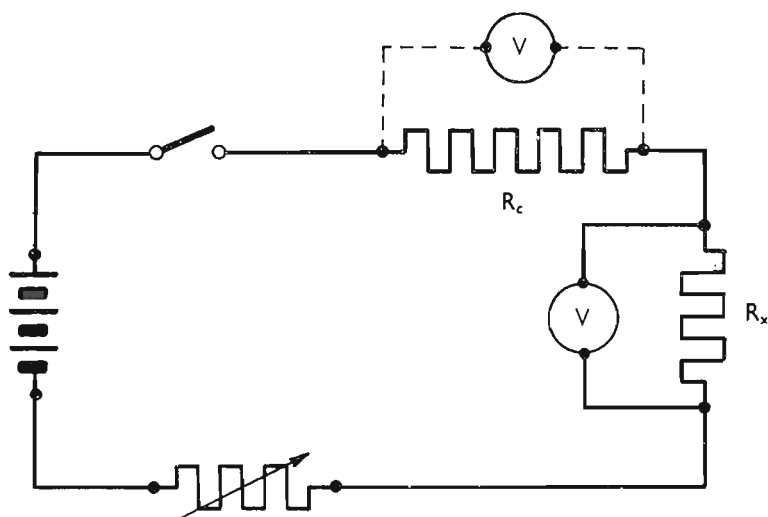



Fig. 14 – Schema per la misura di una resistenza ohmmica con il metodo di confronto. Relazione da usare

$$R_x = R_c \frac{V_x}{V_c}$$

[1] Per maggiori particolari vedere Bossi-Coppi, « *Misure Elettriche* » vol. 1°, Ed. Hoepli.

ribilmente usato quando, attraverso l'aumento di resistenza, si voglia risalire alla temperatura assunta dagli avvolgimenti in rame o in alluminio.

Per l'applicazione del metodo termometrico si usano termometri con sensibile ad alcool o a mercurio, termometri elettrici a resistenza o termocoppie, purchè questi apparecchi non siano quelli predisposti dal costruttore durante l'approntamento della macchina.

La misura della temperatura, mediante il metodo per resistenza, si attua misurando con un qualsiasi metodo di ponte la resistenza (R_1) degli avvolgimenti a temperatura ambiente (t_1) e si ripete la misura una volta raggiunta la temperatura di regime (R_2); il valore della temperatura finale (t_2) dell'avvolgimento si ricava dalla relazione

$$t_2 = t_1 + \frac{R_2 - R_1}{R_1} (A + t_1)$$

nella quale A assume un valore pari a 234,5 per il rame e a 230 per l'alluminio.

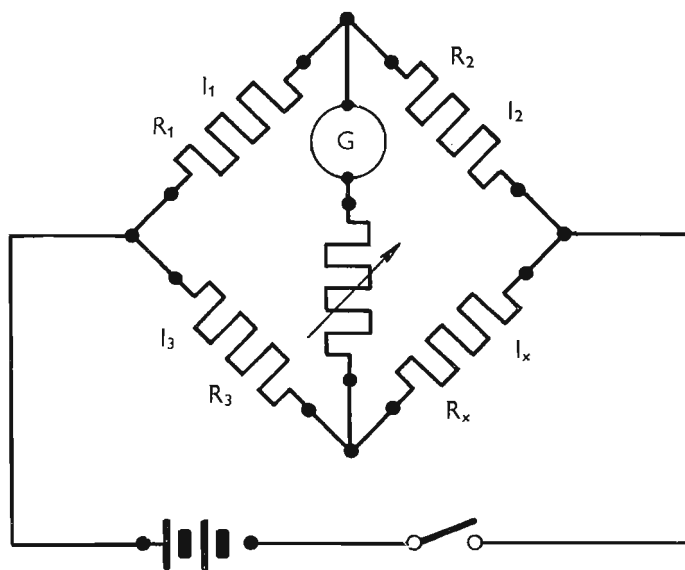



Fig. 15 – Schema per la misura di una resistenza ohmmica con il ponte di Wheatstone. Relazione da usare

$$R_x = \frac{R_2}{R_1} \cdot R_3$$

Nelle figg. 14, 15, 16 sono riportati vari schemi che si possono usare per la misura di resistenze ohmmiche.

La misura delle temperature raggiunte dalla macchina assume una grande importanza nella prova di riscaldamento, ossia nella prova durante la quale si determina il massimo valore della potenza nominale.

Per la prova occorre sottoporre la macchina ad un carico tale da riprodurre le condizioni di massimo lavoro, ossia occorre fare in modo che la macchina assorba la corrente nominale primaria alla tensione nominale, ed eroghi il valore nominale della corrente secondaria.

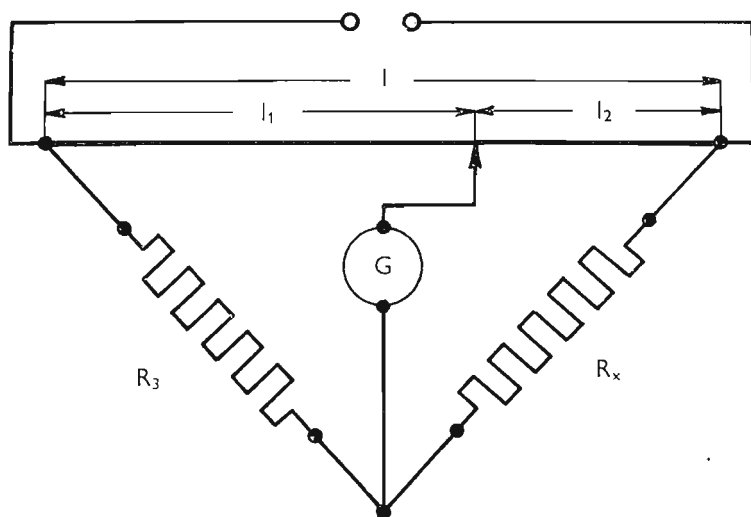



Fig. 16 – Schema per la misura di una resistenza ohmmica con il ponte a filo. Relazione da usare

$$R_x = \frac{l - l_1}{l_1} \cdot R_3$$

In queste condizioni la temperatura della macchina aumenta fino a portarsi a regime, e cioè nella condizione di bilanciamento fra il calore prodotto e il calore asportato.

Le Norme CEI stabiliscono che si consideri raggiunta la temperatura di regime, quando il valore della sovratemperatura assunta dalla macchina, non aumenta più di 2 °C all'ora.

Prove d'isolamento

Le prove d'isolamento che si conducono sui trasformatori hanno lo scopo di verificare la tenuta degli isolanti in condizioni normali e in condizioni particolarmente onerose, quando la macchina sia destinata all'esercizio su reti esposte, ossia su reti nelle quali siano compresi elettrodotti in linea aerea che alimentano la cabina in modo diretto.

Le prove di isolamento si suddividono nelle seguenti:

— prove con tensione applicata;
— prova con tensione indotta;
— prova con impulsi di tensione.

Prove d'isolamento con tensione applicata

La prova d'isolamento con tensione applicata da eseguire, secondo le Norme CEI, sui trasformatori di potenza, si divide in due parti:

— prova di breve durata;
— prova di lunga durata.

La prima deve essere eseguita con una tensione pari al livello d'isolamento dell'avvolgimento in prova e deve protrarsi per un minuto; la seconda, si esegue ad una tensione di poco superiore alla nominale dell'avvolgimento, ma si protrae per 40 minuti.

Le prove con tensione applicata si eseguono su macchine nelle quali i circuiti elettrici sono pienamente isolati da terra.

La tensione di prova deve essere applicata, successivamente fra ciascun circuito elettrico e tutti gli altri circuiti collegati a massa.

Per macchine previste per funzionare con una tensione superiore a 500 V si esegue per prima la prova di lunga durata, applicando per 40 minuti una tensione uguale a 1,3 volte la maggiore delle tensioni di targa.

Successivamente si esegue la prova di breve durata, applicando, per un minuto il valore di tensione indicato nella tabella 3 per le macchine non coordinate per tensioni nominali d'isolamento, e nella tabella 4 per quelle coordinate.

La tensione usata per la prova deve essere alternativa a frequenza industriale e di forma praticamente sinusoidale. Essa va applicata alla

TABELLA N. 3 – **Valori delle tensioni di prova per la prova di breve durata da usare per macchine non coordinate per tensioni nominali di isolamento secondo le Norme CEI per le tensioni normali.**

1	2	3	4
Caso	Prova di	Tensione di prova (V)	Osservazioni
1	Macchine in generale (escluse quelle di cui ai casi 2 e 3)	$2E + 1000$	
2	Avvolgimenti primari di trasformatori di distribuzione (con tensione secondaria inferiore a 550 V) aventi una tensione primaria superiore a 550 V.	$2E + 1000$ con un minimo di 10 000 V	E = la più alta delle tensioni di targa in volt per l'avvolgimento considerato (1)
3	Trasformatori per raddrizzatori: *a*) avvolgimento primario	$2E + 1000$	E = valore efficace della tensione primaria del trasformatore.
	b) avvolgimento secondario	$3E_c + 5000$	E_c = valore medio della tensione nominale del raddrizzatore dal lato corrente continua.
	c) bobine anodiche	$3E_c + 5000$	
	d) bobine di assorbimento	$2E_c + 1000$	
	e) bobine catodiche	$2E_c + 1000$	
4	Gruppi di macchine e apparecchi riuniti (2)	—	—

(1) Per avvolgimenti in serie, E denota il valore efficace della tensione della rete sulla quale essi sono inseriti.

(2) Quando la prova deve essere eseguita su un gruppo di macchine o apparecchi nuovi installati in posto e collegati e che siano già stati singolarmente sottoposti alla prova di breve durata, la tensione di prova non deve superare l'85% della minore fra le tensioni applicabili ai singoli apparecchi.

macchina con un valore iniziale inferiore alla metà della tensione di prova, aumentando quindi il valore della tensione per gradini non superiori al 5% del valore finale.

TABELLA N. 4 – **Valori delle tensioni di prova per la prova di breve durata da usare per le macchine coordinate per le tensioni nominali di isolamento, secondo le Norme CEI per le tensioni normali.**

1	2
Tensione nominale d'isolamento (V_i) (kV)	Tensione di prova per un minuto a frequenza industriale (kV)
0,05	0,5
0,25	1,5
0,40	2
0,50	2,5
1	5
3	16
6	22
10	28
15	38
20	50
30	70
60	140
80	185
150	325
220	460

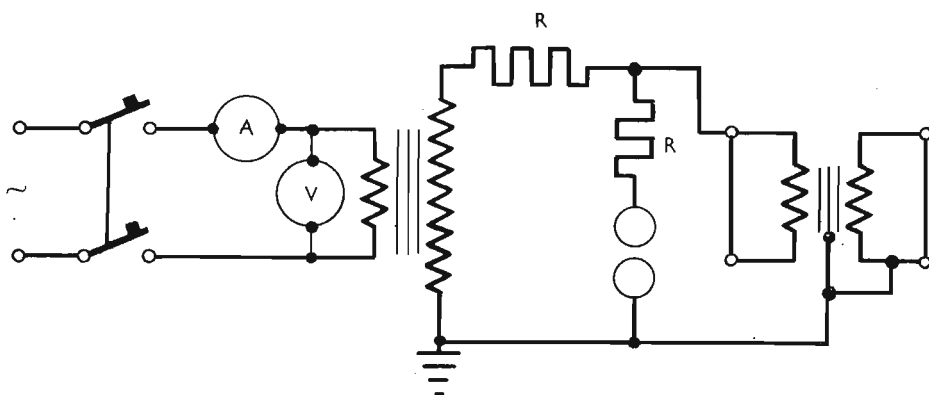



Fig. 17 – Schema del circuito necessario per effettuare la prova di tensione applicata.

Il tempo impiegato per l'aumento della tensione, dalla metà al valore finale, deve essere almeno di 10 secondi.

La durata delle singole prove va computata dall'istante nel quale il valore finale è stato raggiunto.

Quando si agisce con tensioni di prova superiori a 25 kV le indicazioni del voltmetro devono essere controllate da uno spinterometro a sfere inserito sull'alta tensione.

Lo schema del circuito che si realizza in questo caso, per effettuare la prova di tensione applicata, è riportato nella fig. 17.

Prova di tensione indotta

La prova di tensione indotta, detta anche « a tensione aumentata » ha per scopo di verificare il grado d'isolamento esistente fra spire contigue degli avvolgimenti, e consiste nel far funzionare gli avvolgimenti stessi ad una tensione superiore a quella d'esercizio, per un tempo determinato.

Per poter eseguire questa prova, senza aumentare in modo notevole i valori d'induzione si ricorre all'aumento della frequenza.

Le Norme CEI in proposito indicano che la macchina deve essere alimentata per una durata corrispondente a 6000 cicli con una tensione uguale a 1,5 volte la più alta delle tensioni nominali, aumentando, se necessario, convenientemente la frequenza, ma non oltre 500 periodi al secondo.

Lo schema del circuito è riportato nella fig. 18.

Prove a impulso di tensione

Le prove a impulso di tensione si eseguono onde accertare se il trasformatore è in grado di sopportare, senza danni, le sollecitazioni conseguenti le sovratensioni d'origine atmosferica che non oltrepassino il valore del livello d'isolamento stabilito per la rete sulla quale devono essere inserite.

Il valore dei livelli d'isolamento a impulso è riportato nella tabella 5 desunta dalle Norme CEI.

Le caratteristiche che distinguono le sovratensioni d'origine atmosferica sono estremamente variabili, come entità, come forma e come durata, ma possono essere ritenute in generale di ampiezza notevole e di durata non superiore a qualche centinaio di microsecondi.

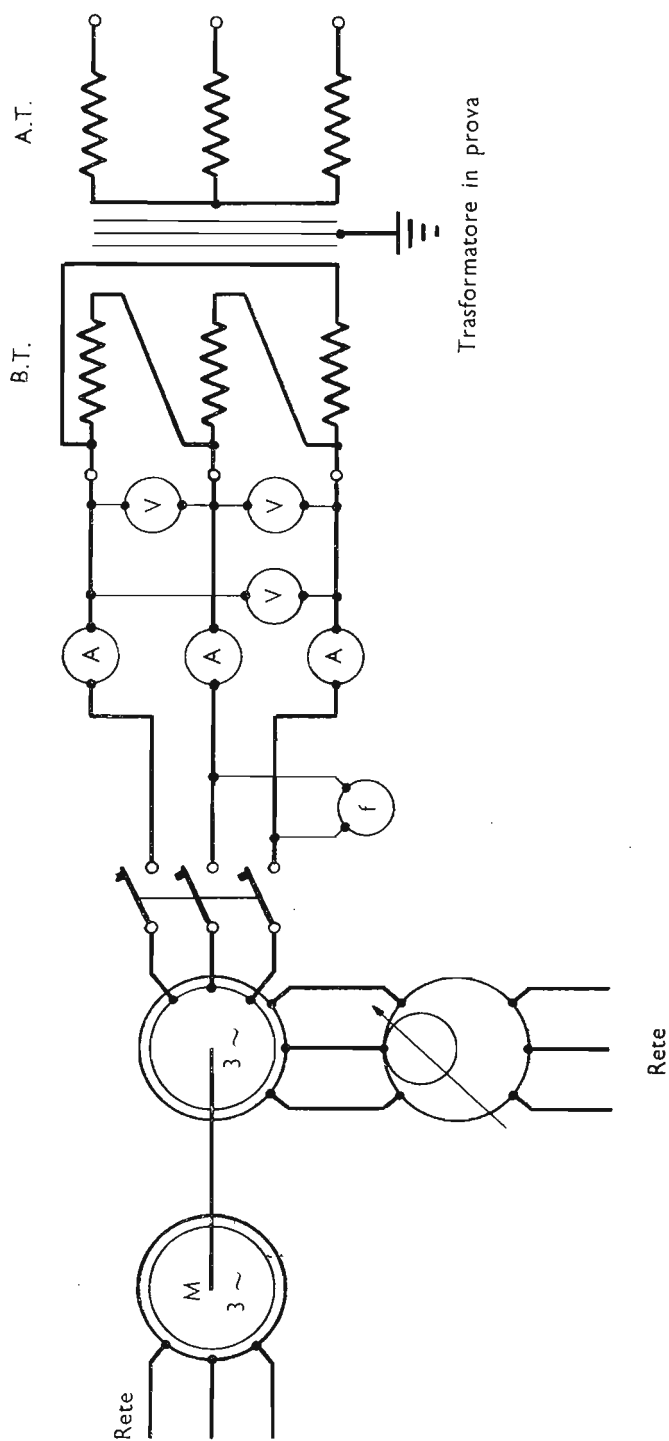



Fig. 18 – Schema del circuito necessario per effettuare la prova di tensione applicata indotta.

TABELLA N. 5 – **Livelli d'isolamento a impulso e tensioni di prova a frequenza industriale.**

1	2	3	4	5	6	7
Tensione nominale d'isolamento V_i kV	Isolamento a impulso				Tensione di prova per un minuto a frequenza industriale (2) kV	
	Livello di protezione scaricatori kV		Livello base (1) kV			
0,05	—		—		0,5	
0,25	—		—		1,5	
0,4	—		—		2	
(0,5)	—		—		2,5	
1 (3)	—		—		5	
3	da definire		45		16	
6			60		22	
10			75		28	
15			95		38	
20			125		50	
30			170		70	
60			325		140	
	Pieno isolam.	Isolam. ridotto	Pieno isolam.	Isolam. ridotto	Pieno isolam.	Isolam. ridotto
80	da definire		450	380	185	150
150			750	650	325	275
220			1050	900	460	395

(1) Tensione di tenuta a impulso a secco per onda piena 1/50 μs positiva e negativa.

(2) I valori indicati valgono sia per gli isolamenti in olio, sia per quelli in aria. Per questi ultimi la prova va eseguita a secco sul materiale per interno, e sotto pioggia su quello per esterno. Per tensioni nominali di isolamento eguali o superiori a 3 kV, ove non sia possibile effettuare la prova a impulso, può essere prescritta, per gli isolamenti in aria, una prova di tenuta di un minuto a frequenza industriale a secco con valori più elevati di quelli indicati.

(3) La tensione nominale d'isolamento di 1 kV vale soltanto per gli impianti di illuminazione in serie.

Benchè in effetti possa essere riprodotto, in via sperimentale, qualunque tipo di sollecitazione, le Norme indicano convenzionalmente l'uso per la prova, di una forma d'onda costituita da un impulso di tensione di tipo unidirezionale, la cui polarità può essere positiva o negativa, distinta dai termini 1/50 la cui raffigurazione è riportata nel diagramma della fig. 19.

Nelle forme d'onda di tensione impulsiva di questo tipo si distinguono i seguenti elementi che le caratterizzano:

a) il valore di cresta;
b) il fronte d'onda;
c) la coda dell'onda.

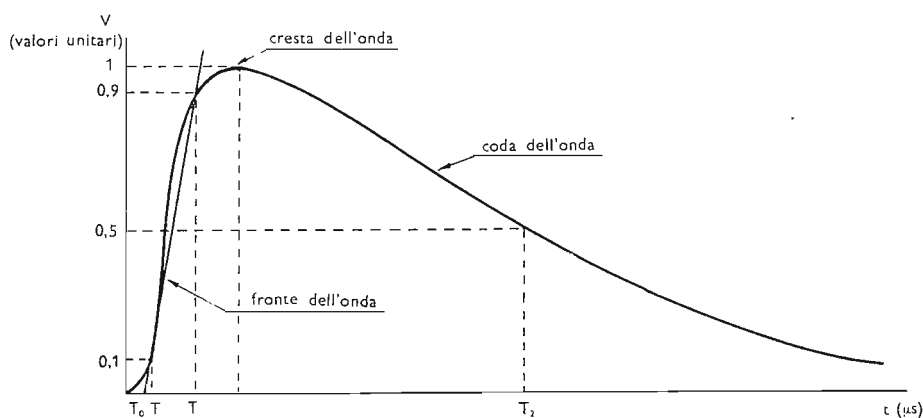



Fig. 19 – Forma d'onda normale 1/50, secondo le Norme CEI, 28-2 1953.

Si definisce valore di cresta il valore massimo che l'impulso raggiunge, espresso in chilovolt; per fronte dell'onda s'intende il tratto di curva compreso fra l'inizio del diagramma e il massimo valore di cresta raggiunto, mentre, per coda dell'onda, si intende il tratto di curva che segue la cresta.

La definizione 1/50 vuol dire che il fronte d'onda ha una durata di un microsecondo, mentre la durata della coda (50 microsecondi) è definita dall'intervallo di tempo intercorrente fra l'origine dell'onda e quello nel quale la tensione decrescente raggiunge la metà del valore di cresta, (emivalore).

I GENERATORI D'IMPULSI

I generatori d'impulsi di tensione sono complessi che si basano sul seguente principio:

— un condensatore (C_1) caricato da una tensione continua di polarità positiva o negativa viene scaricato, repentinamente, attraverso uno spinterometro a sfere, su un circuito esterno contenente i resistori

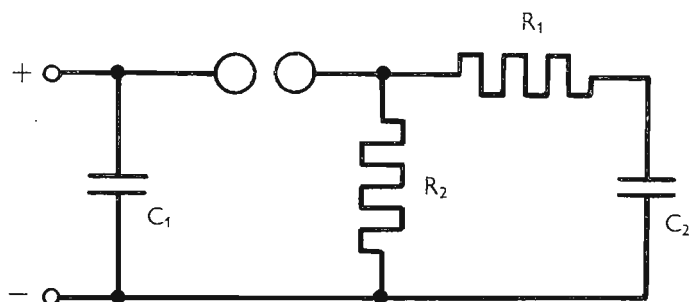



Fig. 20 – Schema di principio di un generatore d'impulsi di tensione.

autoinduttivi R_1 e R_2 ed un condensatore (C_2) che può rappresentare, in prima approssimazione, la capacità del trasformatore in prova.

Lo schema di principio del circuito è quello riportato nella fig. 20.

È evidente che se vengono messi in serie vari dispositivi del genere si ottiene il valore di tensione di cresta desiderato, e con accorgimenti che non staremo ad approfondire, la forma d'onda voluta.

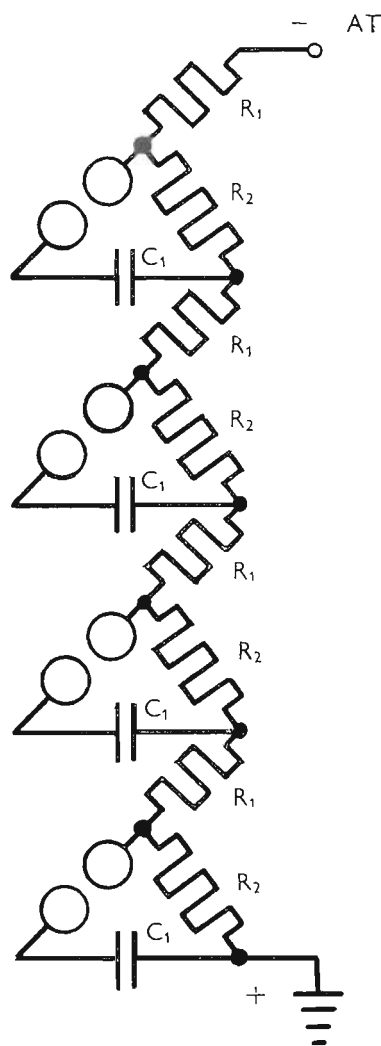



Fig. 21 – Schema elettrico di un generatore d'impulsi di tensione a quattro stadi.

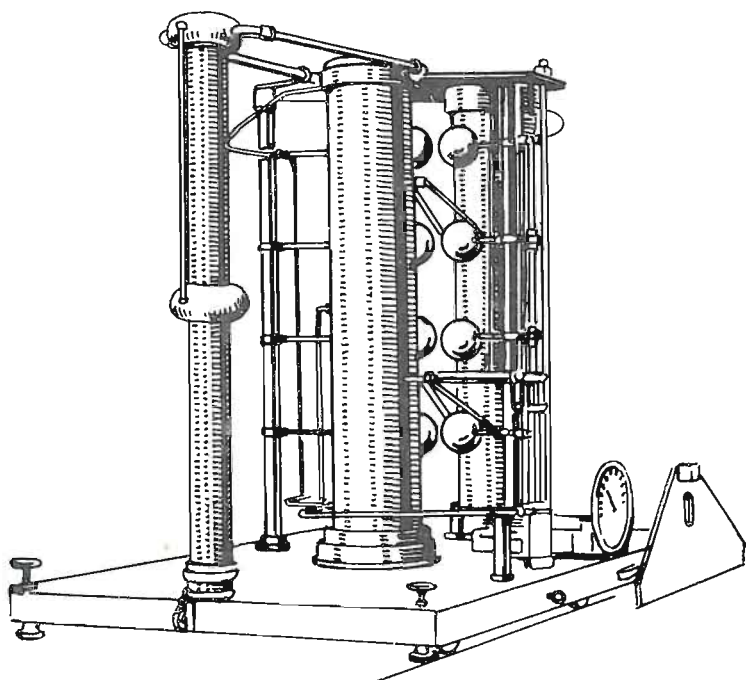



Fig. 22 – Vista esterna di un generatore d'impulsi.

Nella figura 21 è riportato uno schema dimostrativo di un generatore d'impulsi, a quattro stadi, mentre nella fig. 22 è riportata la vista esterna di un tipo di questi apparecchi.

Modalità per l'esecuzione della prova a impulsi

Secondo le Norme CEI, la prova di tenuta dell'isolamento agli impulsi di tensione, deve essere condotta con onda piena, e deve, per evidenti ragioni, precedere le prove d'isolamento eseguite con tensione applicata e con tensione indotta.

Il generatore d'impulsi deve essere collegato ad uno solo dei terminali dell'avvolgimento in prova e il circuito di ritorno deve essere collegato, in un unico punto, ad una presa di terra; condizione indispensabile per una corretta esecuzione della prova.

Gli altri terminali si collegano al circuito di ritorno e quindi a terra,

seguendo queste indicazioni:

— nel caso di avvolgimento monofase, il terminale libero deve essere collegato direttamente al circuito di ritorno del generatore d'impulsi (fig. 23), come nel caso di avvolgimento trifase senza neutro accessibile (fig. 24).

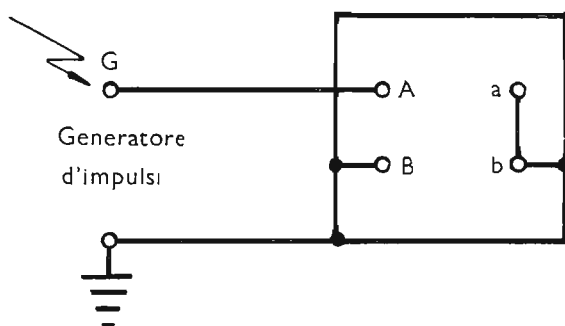



Fig. 23 – Collegamento di un trasformatore monofase per la prova a impulso.

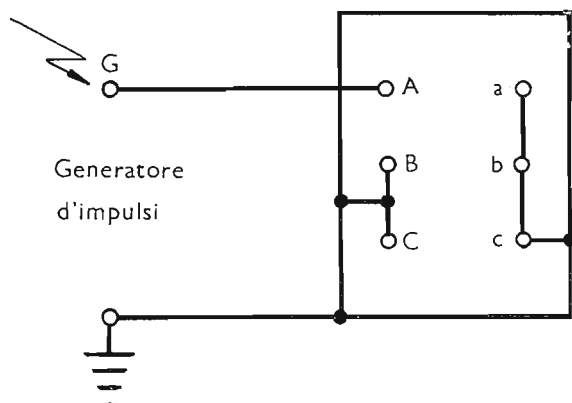



Fig. 24 – Collegamento di un trasformatore trifase con neutro non accessibile per la prova a impulso.

— nel caso di avvolgimento trifase a stella con neutro accessibile, questo va collegato direttamente al circuito di ritorno, mentre i terminali di linea liberi devono essere collegati a terra in modo diretto, o mediante l'interposizione di una resistenza avente un valore sufficiente

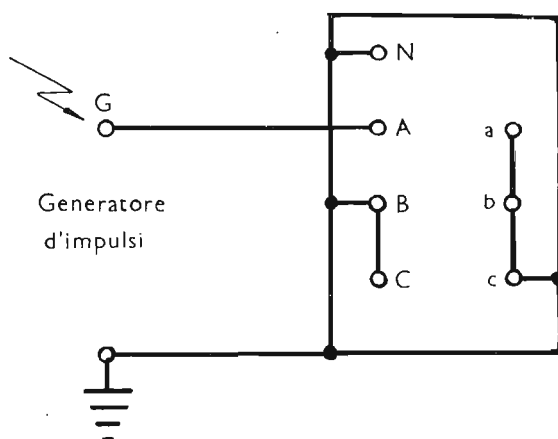



Fig. 25 – Collegamento di un trasformatore trifase con neutro accessibile per la prova a impulso.

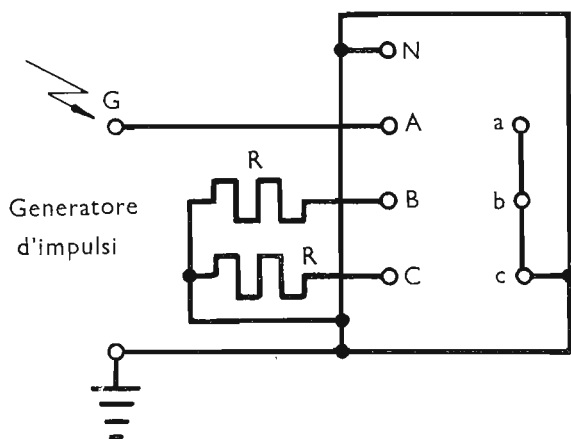



Fig. 26 – Collegamento dei circuiti di ritorno nel caso di un trasformatore trifase con neutro accessibile, mediante l'inserzione di una resistenza limitatrice.

a limitare, durante la prova, la tensione ad un valore inferiore all'80% di quello previsto per la prova dell'avvolgimento (figure 25, 26).

Valori delle tensioni di prova e numero degli impulsi

La prova con tensione impulsiva di un avvolgimento si esegue applicando, a ciascuno dei terminali tre impulsi con onda piena alla tensione di prova.

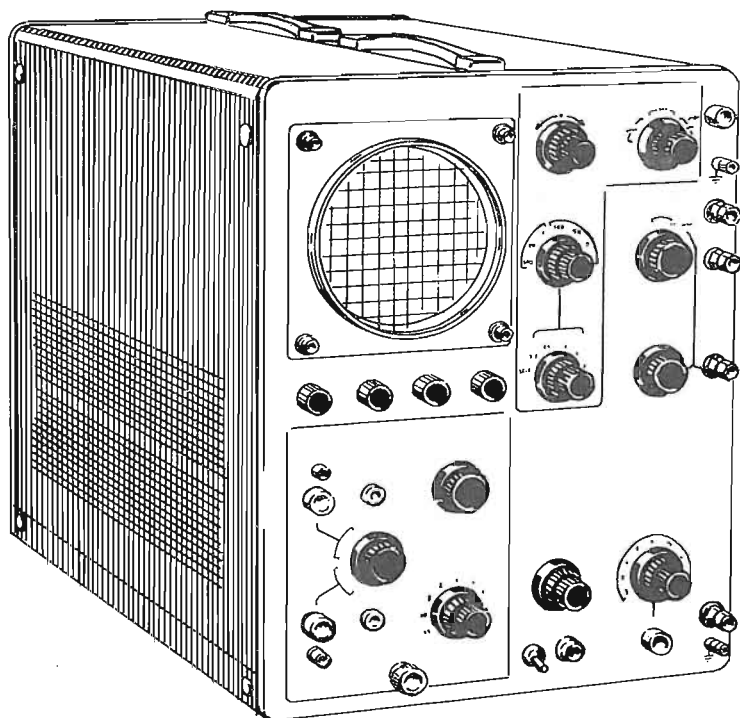



Fig. 27 – Vista esterna di un oscillografo a catodo caldo.

La polarità dell'onda può essere negativa o positiva, purchè il segno venga mantenuto uguale per tutte le prove.

Il valore degli impulsi da applicare, per macchine non coordinate deve essere convenuto fra costruttore e acquirente; per macchine coordinate per le tensioni d'isolamento normalizzato i valori di tensione impulsiva sono indicati nella tabella 5 a pag. 36.

La misura del valore di tensione che viene applicato si esegue mediante una registrazione oscillografica.

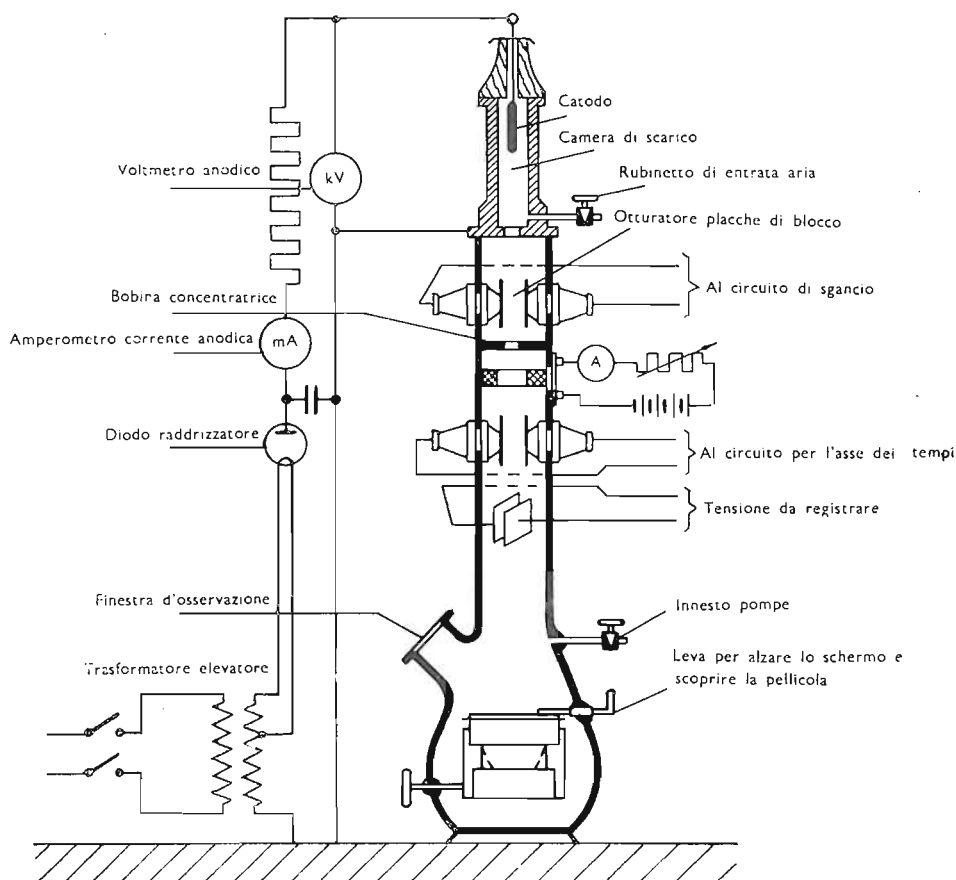



Fig. 28 – Rappresentazione della forma e degli elementi che costituiscono un oscillografo a catodo freddo.

L'oscillografo può essere indifferentemente del tipo a catodo caldo (fig. 27) o a catodo freddo (fig. 28), per ogni oscillogramma è necessario registrare una scala dei tempi (frequenza campione), onde rilevare la durata dell'impulso.

Rilevazione di eventuali guasti

Quando durante lo svolgimento della prova si dovessero verificare guasti di entità rilevante, come una scarica verso massa, o una scarica fra un notevole numero di sezioni dell'avvolgimento, si avrebbe come

conseguenza una modifica della forma d'onda della tensione applicata, si avvertirebbero rumori di scarica provenienti dalla macchina, e, nel caso che questa fosse dotata di relè ad espansione di gas si potrebbe notare la formazione di gas di decomposizione dell'olio.

Dalla rilevazione di questi fenomeni è evidente l'esito sfavorevole della prova, ma in molti casi le anomalie sono di entità così modesta che la determinazione diviene molto più difficoltosa.

In genere si tratta di piccole scariche fra due spire contigue o di scariche che avvengono su modeste sezioni dell'avvolgimento per le quali è da escludere qualunque manifestazione uditiva o la formazione di gas. In questo caso è necessario ricorrere alla registrazione all'oscillografo di qualche grandezza suscettibile di fornire con sufficiente sensibilità, le indicazioni relative a guasti di piccola entità.

Senza dilungarci eccessivamente sull'argomento diremo che, in genere si ricorre ad uno dei seguenti metodi:

— metodo della corrente di neutro;
— metodo della corrente di cassa;
— metodo induttivo;
— metodo della corrente capacitiva secondaria.

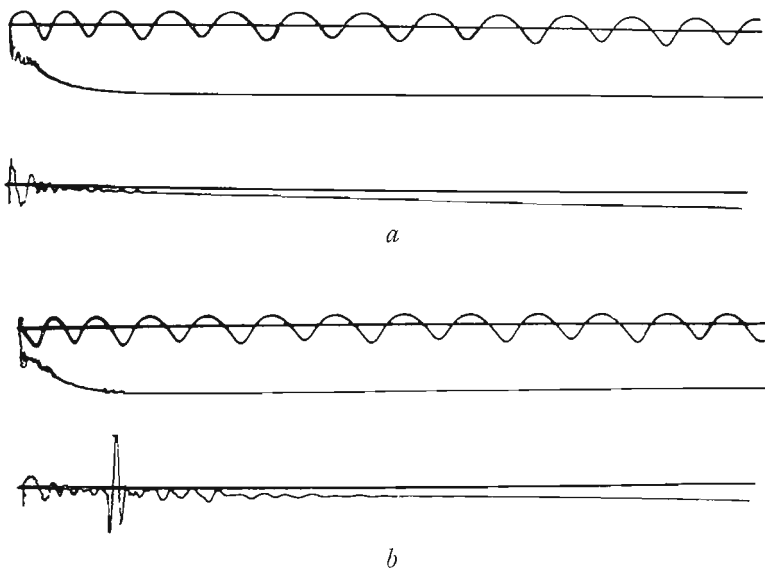



Fig. 29 – Oscillogrammi ottenuti con il metodo della corrente di neutro: *a*) oscillogramma campione; *b*) oscillogramma con guasto interessante una sezione.

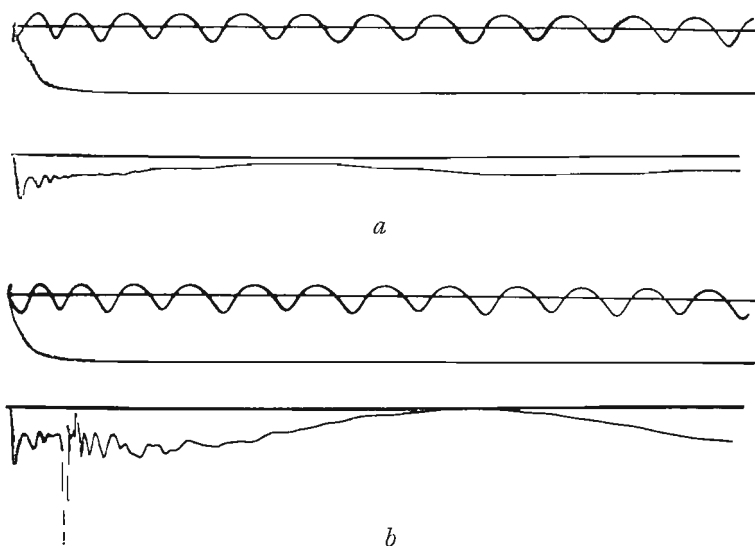



Fig. 30 – Oscillogrammi ottenuti con il metodo della corrente di cassa: *a*) oscillogramma campione; *b*) oscillogramma con guasto interessante una sezione.

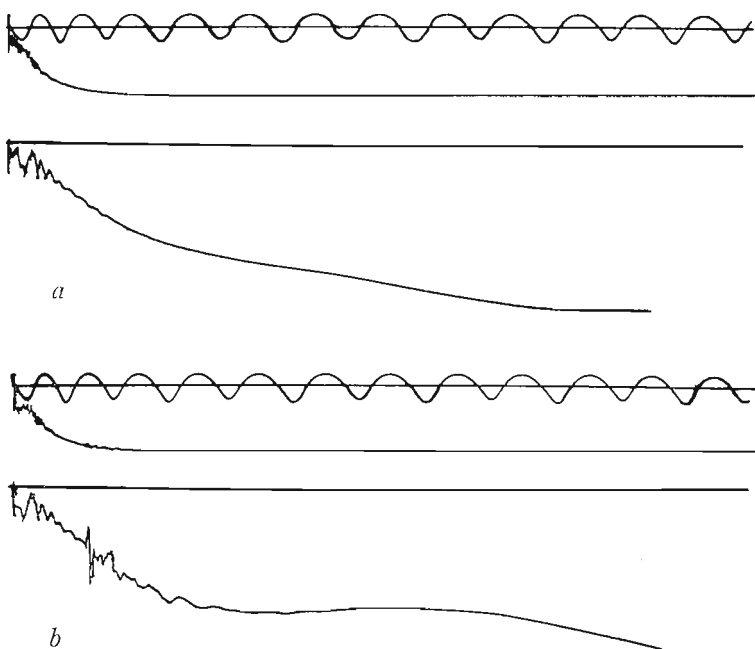



Fig. 31 – Oscillogrammi ottenuti con il metodo della tensione indotta: *a*) oscillogramma campione; *b*) oscillogramma con guasto interessante una sezione.

In ogni caso è necessario, prima della prova eseguire una registrazione testimonio, condotta a tensione ridotta, e confrontare poi l'oscillogramma ottenuto con quello registrato a piena tensione.

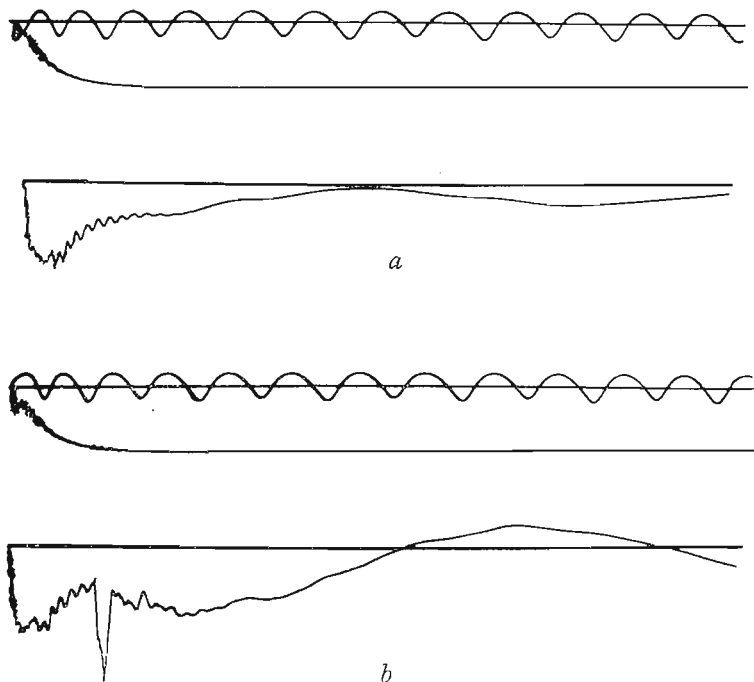



Fig. 32 – Oscillogrammi ottenuti con il metodo della corrente capacitiva secondaria: *a*) oscillogramma campione; *b*) oscillogramma con guasto interessante una sezione.

Perchè il lettore si renda conto delle differenze riscontrabili nei vari casi, fra l'oscillogramma testimonio e quello reale, quando si abbiano manifestazioni di guasto, riportiano, per i vari metodi, le figurazioni ottenute (figg. 29, 30, 31, 32).

Nella tabella 6 sono riportati a titolo indicativo gli schemi elettrici da usare per la rilevazione dei guasti ottenuta con i metodi riportati.

DETERMINAZIONE DELLE PERDITE NEI TRASFORMATORI

Le perdite nei trasformatori sono divise in due parti nettamente distinte:

— perdite nel ferro,
— perdite nel rame.

Esse rappresentano il costo della trasformazione della potenza, ossia l'onere che inevitabilmente accompagna questo fenomeno.

Si può affermare che un trasformatore è tanto più pregiato quanto minori sono le perdite che esso presume durante l'esercizio, quindi è sommamente interessante, per il committente, un attento controllo di questi valori, condotto in modo da rilevare la rispondenza dei risultati con i dati che il costruttore avrà, a questo proposito esposto nell'offerta.

Il valore delle perdite nel ferro si ottiene dalla « prova a vuoto » e quello delle perdite nel rame dalla « prova in corto circuito ».

Prova a vuoto

È noto che sottoponendo un materiale magnetico ad una magnetizzazione variabile nel tempo, si crea in esso una dissipazione d'energia sotto forma di calore.

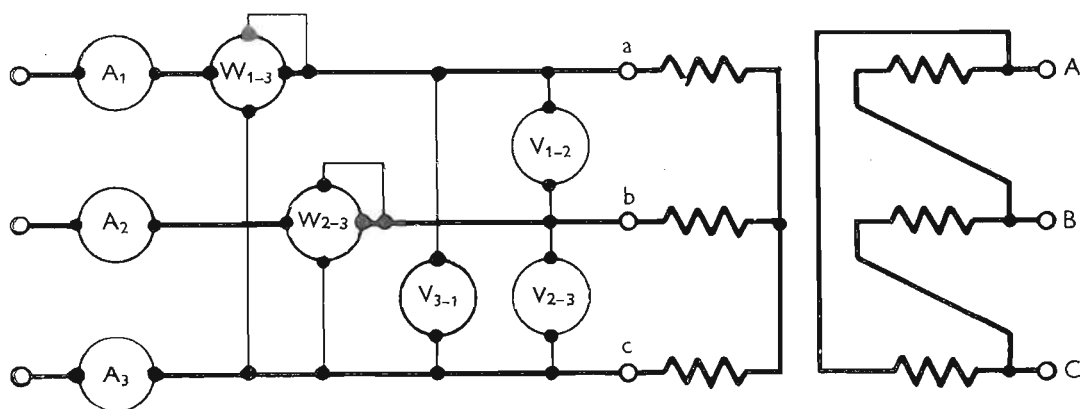



Fig. 33 - Schema per l'esecuzione della prova a vuoto di un trasformatore trifase. Inserzione degli strumenti sistema Aron.

Questa dissipazione d'energia è causata dal fenomeno dell'isteresi magnetica e delle correnti parassite che dipendono dal valore della conducibilità elettrica del materiale magnetico impiegato, in quanto, quando si sottopone del ferro all'azione di un flusso variabile, il ferro stesso diviene sede di forze elettromotrici e di correnti indotte.

I lamierini usati per il pacco magnetico dei trasformatori possono essere lamierini legati al silicio, o lamierini a cristalli orientati che presentano perdite relativamente ridotte.

In definitiva le perdite nel ferro di un trasformatore sono rappresentate dal valore della potenza assorbita dalla macchina, quando viene alimentata alla tensione e alla frequenza nominale, lasciando aperto l'altro avvolgimento.

Dovendo eseguire la prova a vuoto per la determinazione delle perdite nel ferro su trasformatori trifase di potenza, si può usufruire del circuito illustrato nella fig. 33 impiegando nella misura tre amperometri, due wattmetri e tre voltmetri e rilevando i valori delle seguenti grandezze:

— tensione

$$V_0 = \frac{V_{12} + V_{23} + V_{31}}{3}$$

— correnti

$$I_0 = \frac{I_1 + I_2 + I_3}{3}$$

— potenza attiva

$$P_a = P_{32} + P_{13}$$

Qualora si volesse determinare il valore del fattore di potenza si può ricorrere alla relazione

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_a}{\sqrt{3}\, V_0 I_0}$$

Durante la prova è necessario assicurarsi che la frequenza del sistema di alimentazione abbia un valore uguale a quello nominale espresso nella targa della macchina.

Prova in corto circuito

Le perdite che si rilevano da una prova in corto circuito condotta su un trasformatore di potenza, si suddividono in perdite ohmiche e perdite addizionali.

In genere per quanto interessa il committente del trasformatore non se ne fa una distinzione, benchè se si dovesse condurre un vero e proprio collaudo, ne sarebbe necessaria la determinazione singola.

Tanto perchè il lettore possa avere un'idea della diversità esistente fra i due tipi di perdite, diremo che il valore delle perdite ohmiche è proporzionale al valore della resistenza degli avvolgimenti e al quadrato della corrente che in essi circola, mentre le perdite addizionali, le quali dipendono dalla disuniformità con la quale la corrente alternata si distribuisce nella sezione dei conduttori in relazione al flusso di dispersione, benchè abbiano come quelle ohmiche le stesse relazioni di proporzionalità, possono essere anche ritenute direttamente proporzionali al quadrato della frequenza e inversamente proporzionali alla resistività del conduttore.

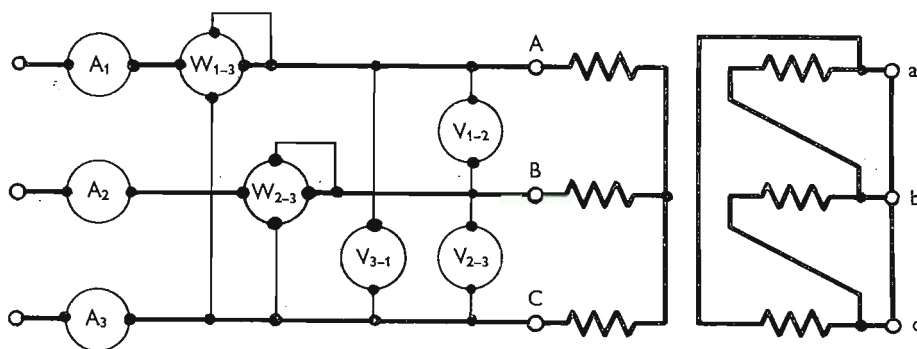



Fig. 34 – Schema per le prove in corto circuito in un trasformatore trifase a due avvolgimenti per la determinazione delle perdite nel rame.

In ogni modo come ripetiamo la valutazione delle perdite nel rame, per i fini del collaudo in forma ridotta, si ottiene ponendo in corto circuito l'avvolgimento secondario del trasformatore e alimentando l'avvolgimento primario con una tensione regolata, pari al valore della tensione di corto circuito.

Lo schema di principio che si realizza è quello riportato nella fig. 34.

Le perdite si desumono dal valore della potenza assorbita, nello stesso modo con il quale sono state determinate le perdite nel ferro.

Il fattore di potenza di corto circuito si ricava dalla relazione

$$\cos \varphi_{cc} = \frac{P}{\sqrt{3}\, V I}$$

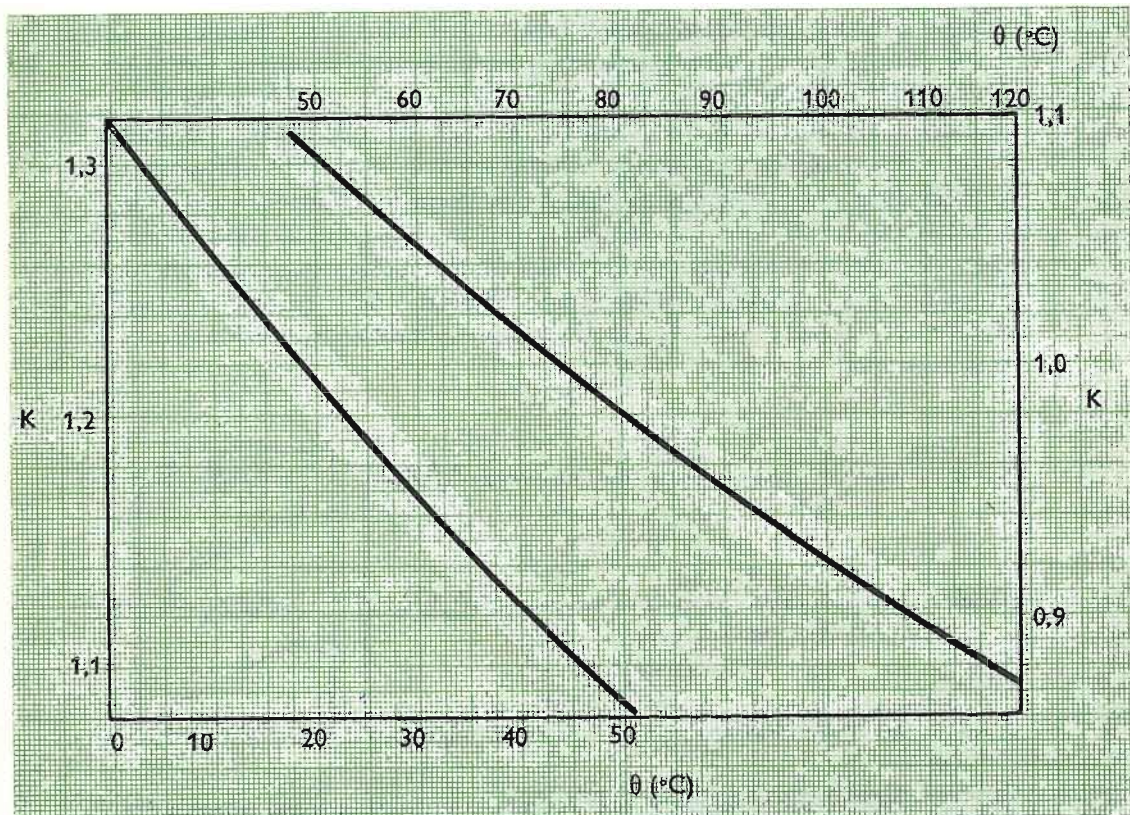



Fig. 35 – Grafico per la determinazione del coefficiente K necessario per riportare a 75 °C il valore delle perdite nel rame di un trasformatore, misurate a temperatura ambiente.

Il valore delle perdite rilevato dalle misure, non può essere direttamente confrontato con quello assicurato dal fornitore in sede di offerta, poichè mentre quello rilevato si riferisce alla macchina a temperatura

ambiente, quello riportato nell'offerta si riferisce alla macchina funzionante a 75 °C di temperatura.

Per ottenere un valore confrontabile occorre moltiplicarlo per un coefficiente (K) determinabile dal diagramma riportato nella fig. 35.

Per trovare il valore di K occorre fissare sull'ascissa il valore della temperatura (t_1) che la macchina aveva al momento della prova, indi, tirando una verticale dal punto così stabilito, si incontra la curva; seguendo dall'intersezione una parallela all'ascissa si legge sull'ordinata il valore del coefficiente.

Le curve riportate nella fig. 35 esprimono il valore del rapporto

$$K = \frac{234{,}5 + 75}{234{,}5 + t_1} = \frac{309{,}5}{234{,}5 + t_1}$$

CAPITOLO V

PARALLELO DEI TRASFORMATORI

Abbiamo fin'ora parlato di macchine singole ma esistono molti casi nei quali è conveniente suddividere la potenza necessaria in più macchine, costituendo con queste un banco di parallelo.

Perchè due o più trasformatori possano agire in parallelo occorre che vengano verificate due condizioni essenziali:

1) che i gruppi CEI e i collegamenti relativi permettano l'unione;
2) che i valori delle tensioni di corto circuito siano uguali o molto vicini.

Rispetto ai collegamenti interni la condizione migliore è che siano identici, ossia che abbiano la stessa forma geometrica e che appartengano allo stesso gruppo (0, 5, 6, 11) (tabella 1 a pagg. 12-13).

In casi particolari è possibile il parallelo quando le forme geometriche sono di numero pari, ossia quando i triangoli e le stelle, comunque siano posti, siano di numero pari. Per esempio un trasformatore stella/triangolo potrà essere messo in parallelo con uno triangolo/stella (2 triangoli e 2 stelle), oppure uno triangolo/triangolo potrà essere collegato con uno stella/stella, non è invece possibile collegare un trasformatore stella/stella con uno triangolo/stella (un triangolo e tre stelle).

Naturalmente questi casi non sono normali e la loro attuazione richiede accorgimenti particolari, essi si verificano in special modo quando si voglia unire, ad un trasformatore funzionante, un altro che non è stato costruito con l'intento di marciare in parallelo con il primo.

Potremo quindi considerare due casi, nella formazione di banchi di trasformazione: nel primo caso, trasformatori identici, la descrizione ci servirà come esempio generale per esporre le verifiche necessarie alla

prova di parallelo; nel secondo caso potremo considerare varie condizioni che possono verificarsi in pratica e nelle quali è difficile sapersi comportare senza una guida efficiente.

Prove di parallelo di due trasformatori identici

Per semplicità, riferendoci alla fig. 37 chiameremo « lato A.T. » quello relativo alle entrate di alta tensione (A.T.), « lato B.T. » quello alle uscite in bassa tensione (B.T.), con *C-B-A* maiuscoli i morsetti di alta tensione, con *c-b-a* minuscoli quelli di bassa tensione, mentre distingueremo con la lettera *n* il morsetto al quale fa capo il conduttore neutro, quando esiste.

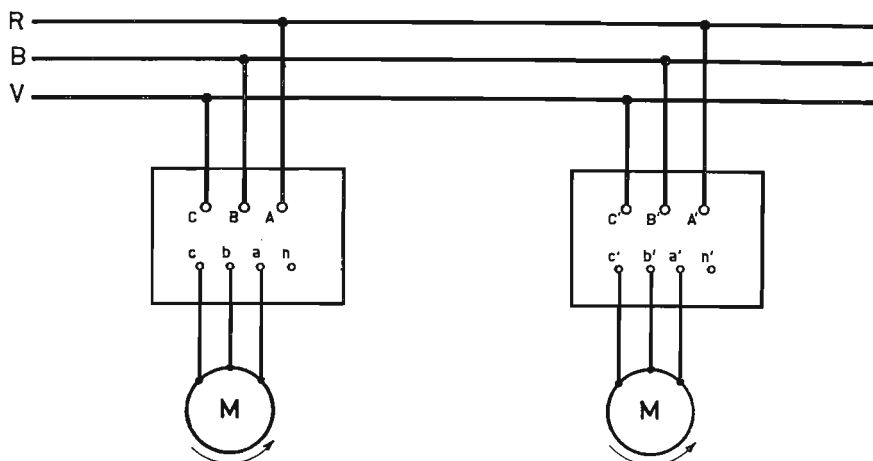



Fig. 36 – Collegamenti necessari per la prova del senso ciclico dei conduttori di fase.

I conduttori di fase sul lato A.T. verranno distinti con le lettere R, B, V, iniziali dei colori rosso, bianco, verde; sul lato B.T. i conduttori di fase saranno distinti con R_1, B_1, V_1.

Nella fig. 36 sono rappresentati due trasformatori collegati dal lato primario e pronti per essere sottoposti alla prova di parallelo.

Sarà opportuno provare prima di tutto il senso ciclico delle fasi, normalmente detto « senso di rotazione », prova che si esegue mediante un motore trifase alimentato a volta a volta dall'uno e dall'altro tra-

sformatore, in modo che collegando i conduttori con i morsetti contrassegnati dalle stesse lettere il motore debba girare nello stesso senso. La prova può essere eseguita più facilmente qualora si possegga un sequenzoscopio.

Occorre però ricordare che fra due sistemi trifasi può ottenersi lo stesso senso di rotazione senza che esista il parallelo, mentre quando esiste il parallelo deve senz'altro coesistere lo stesso senso di rotazione. Infatti se in un motore trifase si invertono tutti i conduttori di fase il senso di rotazione rimane invariato.

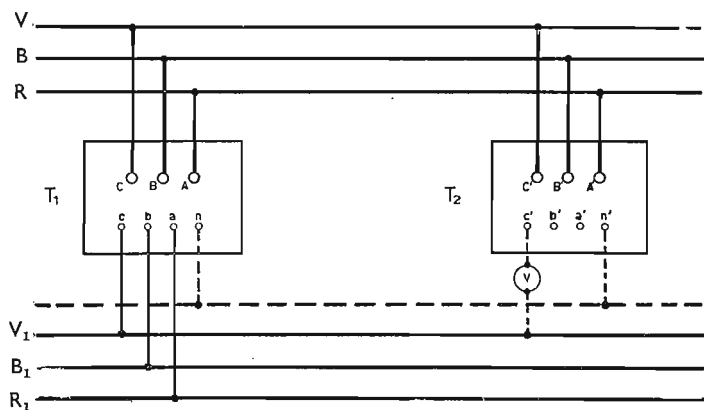



Fig. 37 – Collegamenti necessari per la prova di parallelo fra due trasformatori trifase e due avvolgimenti aventi la parte a bassa tensione collegata a stella con neutro accessibile.

Per la prova di parallelo occorre creare, fra i secondari dei trasformatori, un ponte metallico di unione che renda possibile il confronto fra le tensioni di fase. Quando esiste il neutro sarà opportuno eseguire il collegamento metallico usufruendo di questo attacco. Mediante l'uso di un voltmetro (vedi fig. 37) dovrà essere verificato il valore della differenza di potenziale esistente fra c' e V_1, b' e B_1, a' e R_1. Se questo valore è costantemente zero, significa che sono soddisfatte tutte le condizioni di parallelo e che il trasformatore *2* può essere collegato al circuito di bassa tensione, in modo simmetrico rispetto al trasformatore *1*.

Eseguiti questi collegamenti, nella cabina, è stato creato un banco di trasformazione formato da due trasformatori in parallelo.

La condizione di parallelo, nel caso di identità dei collegamenti e

del gruppo di appartenenza, comprende l'uguaglianza del valore percentuale della tensione di corto circuito, e ciò porta a considerare il valore della potenza dei trasformatori, in quanto sarebbe troppo oneroso mantenere la stessa tensione di corto circuito quando fra le macchine esiste una grande differenza di potenza.

In pratica si considera conveniente realizzare le condizioni di parallelo quando il rapporto delle potenze è inferiore o uguale a tre. Se per esempio si avesse un trasformatore da 300 kVA, esso, al limite, potrebbe essere messo in parallelo con uno da 100 kVA,

$$\frac{300}{100} = 3$$

mentre non sarebbe conveniente realizzare un banco di parallelo con un trasformatore da 300 kVA e uno da 50 kVA,

$$\frac{300}{50} = 6$$

Influsso della tensione di corto circuito sulle condizioni di funzionamento in parallelo

Il valore della tensione di corto circuito è determinante per il corretto funzionamento in parallelo dei trasformatori, in quanto, a parità di collegamento, gruppo e rapporto, influisce sul valore della tensione a vuoto.

Una differenza fra le tensioni a vuoto dei trasformatori crea una corrente di circolazione permanente fra le macchine che ne diminuisce la potenza, in quanto il carico effettivo è costituito dalla somma dell'intensità di corrente erogata, sia per l'alimentazione degli utilizzatori che per correnti di circolazione che, nel caso particolare, rappresentano in definitiva un aumento delle perdite.

È possibile stabilire il valore della corrente di circolazione che si avrà in un banco di trasformazione usando la seguente relazione:

$$I c = I_2 \frac{\Delta V}{V cc_1 \dfrac{I_1}{I_2} + V cc_2}$$

nella quale i simboli assumono i seguenti significati:

$I c$ = valore della corrente di circolazione nel funzionamento in parallelo;
I_1 = valore della corrente secondaria del 1° trasformatore;
I_2 = valore della corrente secondaria del 2° trasformatore;
$V cc_1$ = valore della tensione di corto circuito in % del trasformatore 1°;
$V cc_2$ = valore della tensione di corto circuito in % del trasformatore 2°;
ΔV = differenza delle tensioni a vuoto dei due trasformatori (valore percentuale riferito alla media).

Tutti i valori indicati sono rilevabili dai dati di targa.

Quando, fra i trasformatori da mettere in parallelo, si verifica una corrente di circolazione eccessiva, è possibile tentare di ridurne il valore agendo sul variatore di tensione, in modo da ridurre la differenza delle tensioni a vuoto.

In questo caso, sulle macchine, dovrà essere apposto un cartello che rammenti a chiunque l'inibizione di modificare la posizione dei variatori.

Questa soluzione non è accettabile che in condizioni estreme, in quanto toglie ai trasformatori la possibilità di adattamento delle tensioni alle necessità degli utilizzatori, possibilità preziosa quando, condizioni stagionali o di sovraccarico impediscono per lunghi periodi all'Azienda distributrice, di fornire l'energia ad un valore di tensione normale.

Parallelo di trasformatori appartenenti a gruppi diversi

Citiamo in questa parte della trattazione alcuni casi nei quali apparentemente non è possibile trovare le condizioni di parallelo. Il lettore deve cercare di capire con esattezza quanto esporremo, in quanto, qualora si dovesse trovare in casi simili, sarà solo ricordando quanto diremo che potrà riuscire a compiere il lavoro.

1° caso. — I due trasformatori hanno i collegamenti *Dy* o *Yd*, oppure *Yz* e nonostante questo dànno tensioni opposte.

In questo caso è evidente che i gruppi di appartenenza sono diversi, ossia che lo spostamento angolare non è uguale nei due casi.

Sarà sufficiente allora scambiare fra loro due collegamenti sul lato alta tensione e cercare poi con il voltmetro i morsetti corrispondenti sul lato di bassa tensione. In questo caso i gruppi di appartenenza dei trasformatori non possono essere che il gruppo 5 e il gruppo 11 (fig. 38).

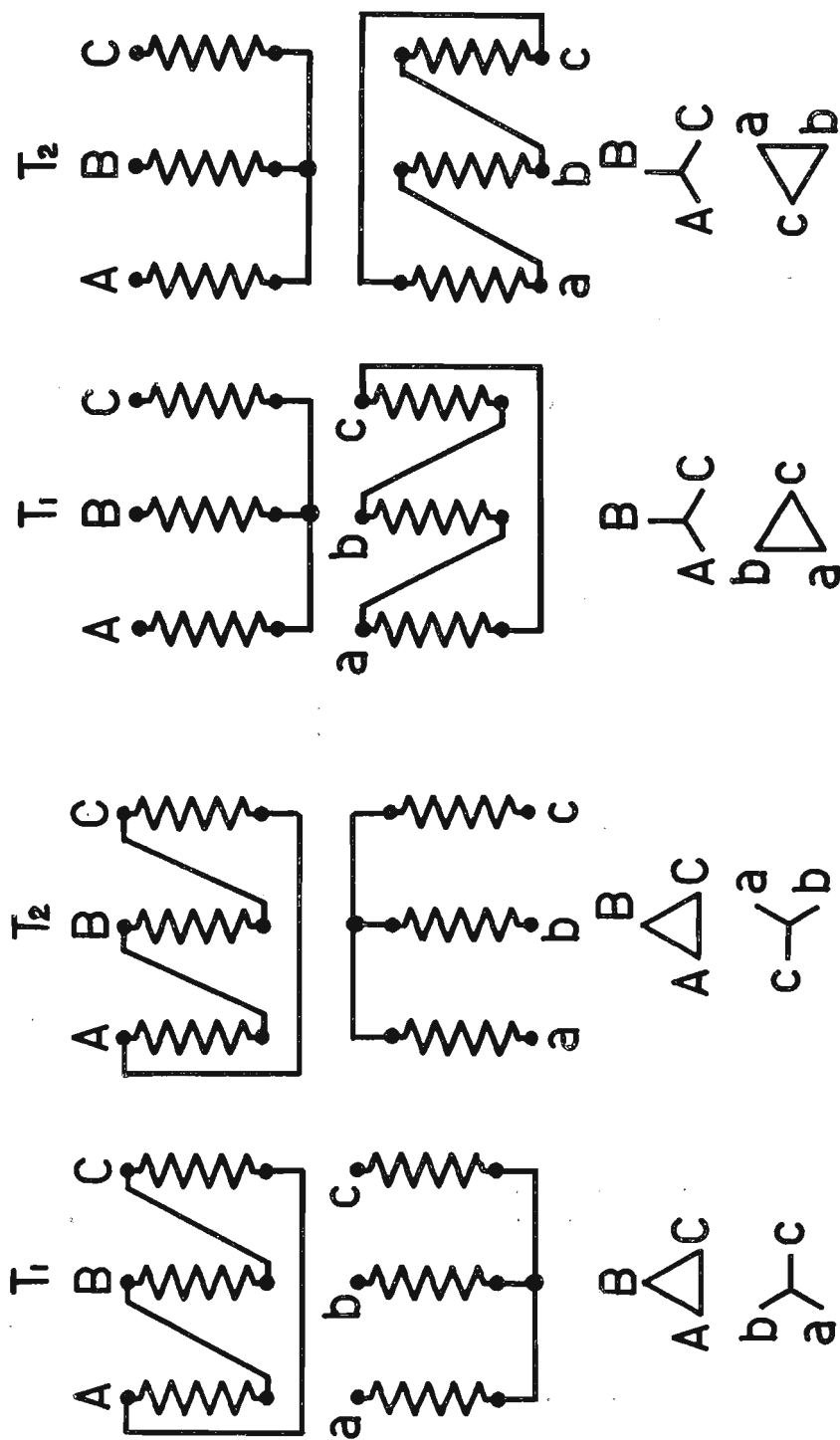



Fig. 38 – Rappresentazione schematica dei collegamenti interni di trasformatori da far funzionare in parallelo, compresi nel 1° caso, prima dell'inversione di un conduttore di fase.

2° caso. — I due trasformatori hanno i collegamenti *Dd* o *Yy* o *Dz*. Come nel primo caso, qualora nonostante l'eguaglianza dei collegamenti non si riesca a trovare il parallelo, occorrerà pensare di trovarsi di fronte a gruppi diversi. Esaminando la tabella 1 vedremo che l'unica possibilità è che uno dei trasformatori appartenga al gruppo 0 e l'altro al gruppo 6 (fig. 39).

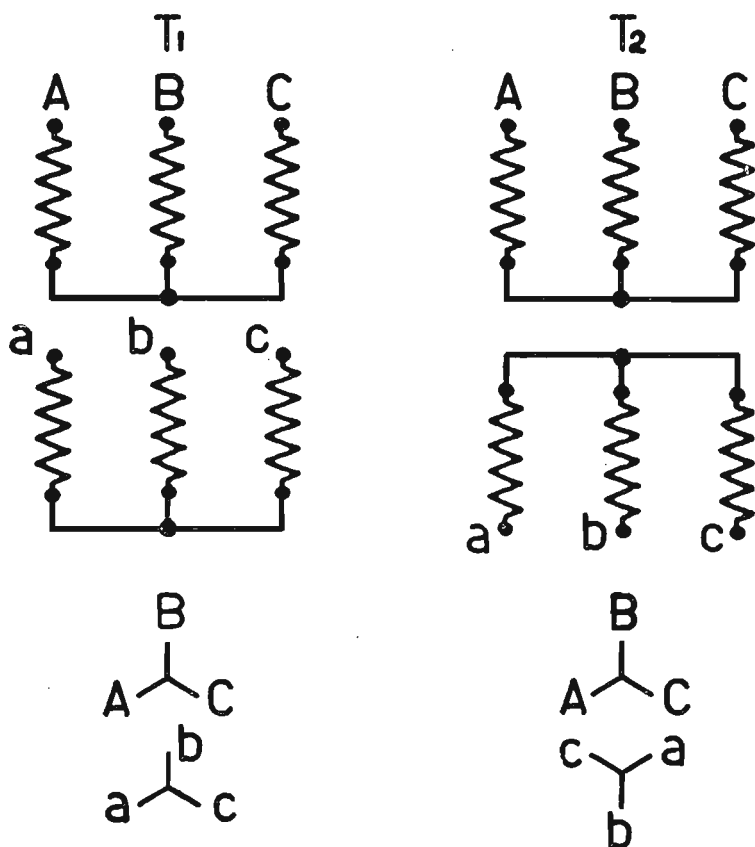



Fig. 39 – Rappresentazione schematica dei collegamenti interni di trasformatori da far funzionare in parallelo, compresi nel 2° caso, prima dell'inversione del collegamento.

In questa conbinazione, a nulla varrebbe lo scambio di due conduttori fase, occorre invece scambiare fra loro il principio con la fine di uno dei due avvolgimenti, in una delle due macchine.

In generale si preferisce intervenire sul lato primario nel quale la modesta sezione del conduttore permette un lavoro più facile. Non sarà possibile questo intervento nel caso del collegamento *Yy* in quanto, scambiando la fine con il principio, si rovescia la situazione d'isolamento, fortemente maggiorato, nelle bobine di testa e che diverrebbe inutile una volta posto nelle bobine finali.

Un altro caso di impossibilità è quello che si ha quando nella stella sono state immesse prese di regolazione manovrabili per mezzo del commutatore. In questi casi si agirà sulla parte di bassa tensione.

In tutti gli altri casi esiste l'assoluta impossibilità in quanto oltre al gruppo manca anche l'identità del collegamento (appartenenza ai gruppi 0, 11 oppure 5, 6), infatti la modifica di uno dei collegamenti da triangolo a stella o viceversa modificherebbe il rapporto di trasformazione, supposto uguale, e di conseguenza non esisterebbe più l'uguaglianza delle tensioni, primo requisito per il funzionamento in parallelo.

Riassumendo quanto abbiamo detto e riferendoci solo ai collegamenti interni e ai gruppi di appartenenza, è possibile mediante accorgimenti creare le condizioni necessarie al parallelo nei seguenti casi:

T 1	*Dy* 5	*Yy* 5	*Yz* 5	*Dd* 0	*Yy* 0	*Dz* 0
T 2	*Dy* 11	*Yy* 11	*Yz* 11	*Dd* 6	*Yy* 6	*Dz* 6

Non è possibile ottenere le condizioni di parallelo nei seguenti casi:

T 1	*Dd* 0	*Yy* 0	*Dz* 0	*Dd* 6	*Yy* 6	*Dz* 6
T 2	*Dy* 11	*Yd* 11	*Yz* 11	*Dy* 6	*Yd* 5	*Yz* 5

Da ciò si può dedurre l'importanza di conoscere con sicurezza il tipo di collegamento e il gruppo, dati che normalmente si rilevano dalla targa.

Ricerca del collegamento e del gruppo

In molte macchine di costruzione non recente manca l'indicazione relativa ai collegamenti interni e al gruppo di appartenenza, in questo caso molti sono i metodi usati per determinare i dati in parola.

Ne indichiamo uno molto semplice e per il quale non necessitano apparecchiature speciali. Tale metodo è conosciuto come « prova d'alimentazione monofase », e serve a determinare la relazione di fase fra primario e secondario.

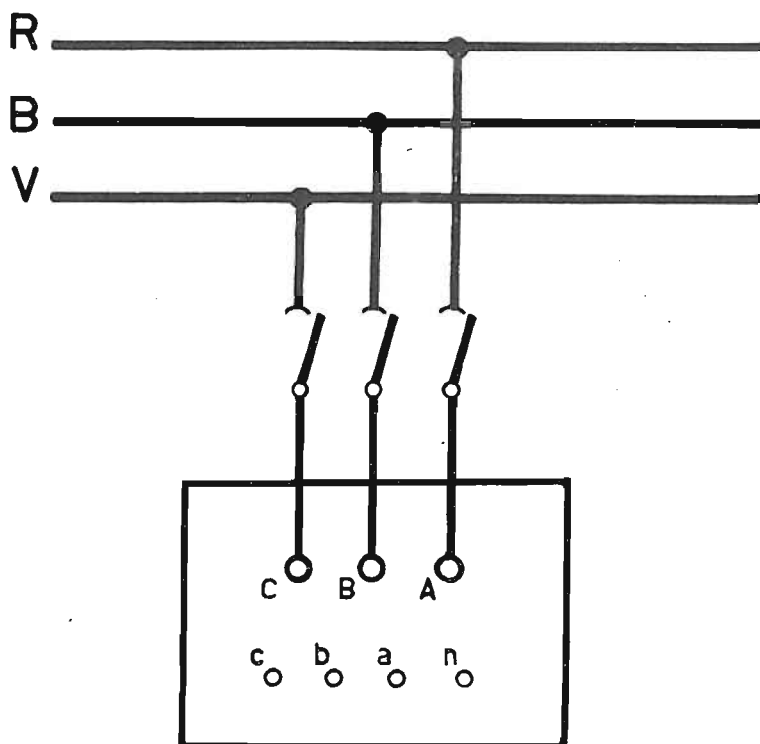



Fig. 40 – Preparazione del circuito per la ricerca del collegamento e del gruppo.

Per la prova occorre collegare il trasformatore con il circuito primario, interponendovi 3 sezionatori a manovra singola, in modo da realizzare a piacere le combinazioni di alimentazione monofase *A-C*, *B-C*, *A-B* (figg. 40-41).

Per ogni combinazione occorre rilevare, mediante un voltmetro, il valore di tensione fra i morsetti d'uscita nelle tre combinazioni *a-b*, *b-c*, *c-a*. I gruppi di appartenenza probabili sono rilevabili nella tabella 7 a pagina 62.

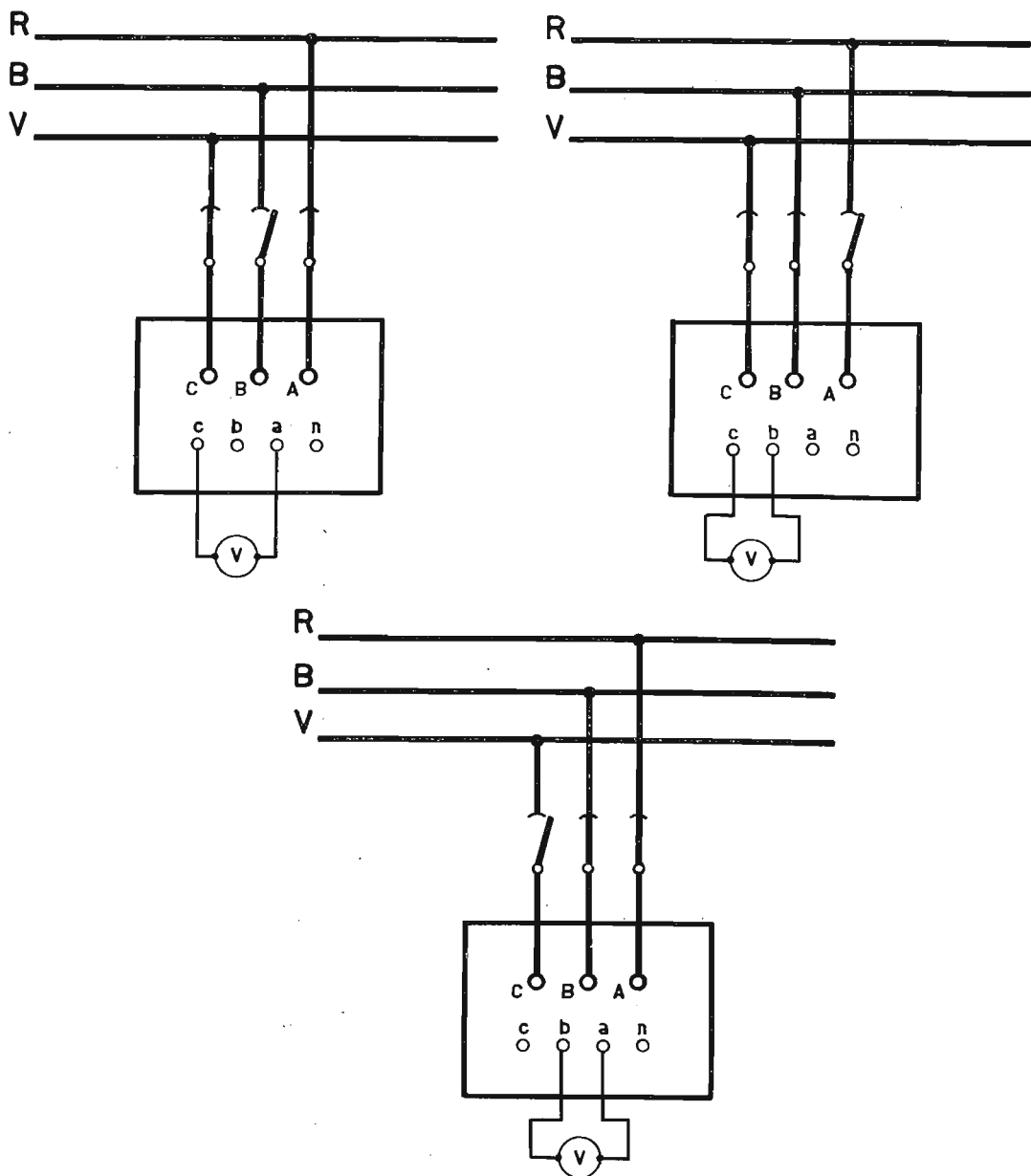



Fig. 41 – Schemi relativi ai collegamenti del voltmetro durante la prova per la ricerca del gruppo e del collegamento degli avvolgimenti per trasformatori trifase a due avvolgimenti.

TABELLA N. 7 – **Tensioni ottenute al secondario (in % della tensione secondaria nominale) alimentando in monofase il primario.**
(Ing. Paleari, *Energia Elettrica*)

Alimentazione fra i morsetti	Tensione secondaria			Collegam. primario	Collegam. secondario	Schema e gruppo
	a-b	*b-c*	*c-a*			
A-C	0,5	0,5	1	*Y*	*y*	*Yy* 0-*Yy* 6
	0	0,866	0,866	*Y*	*d, z*	*Yd* 5-*Yz* 5 *Yd* 11-*Yz* 11
	0,866	0	0,866	*Y*	*d, z*	*Yd* 1-*Yz* 1 *Yd* 7-*Yz* 7
B-C	0,866	0,866	0	*D*	*y*	*Dy* 11-*Dy* 5
	0,5	1	0,5	*D*	*d, z*	*Dd* 0-*Dz* 0 *Dd* 6-*Dz* 6
	1	0,5	0,5	*D*	*d, z*	*Dd* 10-*Dz* 10 *Dd* 4-*Dz* 4
A-B	0,866	0,866	0	*D*	*y*	*Dy* 1-*Dy* 7
	0,5	1	0,5	*D*	*d, z*	*Dd* 2-*Dz* 2 *Dd* 8-*Dz* 8
	1	0,5	0,5	*D*	*d, z*	*Dd* 0-*Dz* 0 *Dd* 6-*Dz* 6

NOTA: La tensione secondaria è data dal valore sopra riportato moltiplicato per il rapporto V_1/K dove V_1 è la tensione di alimentazione usata per la prova e K è il rapporto di trasformazione della macchina. Questo, se non è noto, è però sempre determinabile in sede di prova con sufficiente approssimazione.

Per l'uso della tabella occorre sottolineare che nella voce « tensione secondaria » sono espressi i valori della tensione in percentuale della tensione nominale secondaria caratteristica della macchina. Ciò è stato fatto per raggiungere lo scopo di rendere generale l'uso della tabella, in quanto i valori che le tensioni possono assumere sono praticamente infiniti.

Naturalmente tale metodo è solo indicativo e serve a fornire un primo orientamento della probabilità che fra i trasformatori considerati esistano le condizioni di parallelo.

Quando mediante questo metodo si sia arrivati a stabilire l'appartenenza del trasformatore ai gruppi *Yy* 0, *Yy* 6, *Dd* 0, *Dd* 6, la ricerca dei morsetti corrispondenti nell'altro trasformatore, avente logicamente lo stesso collegamento, dà senz'altro esito positivo. Questo può non avvenire quando il gruppo di appartenenza è compreso fra i gruppi *Yd* 5, *Yd* 11, *Yd* 1, *Yd* 7, in quanto l'avvolgimento secondario collegato al triangolo può:

1) non essere avvolto nello stesso senso;

2) pur essendo avvolto nello stesso senso ha i collegamenti fra le bobine rovesciati, ossia i lati del triangolo sono collegati in modo contrario all'altro trasformatore.

Nel primo caso, collegando simmetricamente i trasformatori sul lato A.T., sul lato B.T. si ottiene, fra i morsetti di ugual nome, una tensione di valore pari a 2 volte la nominale.

Per poter realizzare il parallelo occorre:

sul lato primario: scambiare fra loro i morsetti estremi (*A* con *B*);

sul lato secondario: scambiare fra loro il morsetto centrale con il morsetto di destra (*a* con *b*).

Nel secondo caso, collegando simmetricamente i trasformatori sul lato primario, sul lato secondario si ottiene, fra i morsetti di ugual nome, una tensione di valore pari alla tensione nominale.

Per poter realizzare il parallelo occorre:

al primario: scambiare fra loro due morsetti qualunque;

al secondario: scambiare fra loro i due morsetti corrispondenti a quelli primari scambiati.

Accorgimenti tecnici per la realizzazione razionale dei banchi di parallelo

Quando occorre realizzare un banco di parallelo fra due o più trasformatori il progettista deve tener presente che i percorsi in sbarra o in cavo necessari per l'unione dei morsetti secondari alle sbarre collettrici devono essere tali da sottointendere, per i conduttori, un'uguale impedenza in modo da non introdurre elementi di squilibrio che impedirebbero lo sfruttamento razionale della potenza installata.

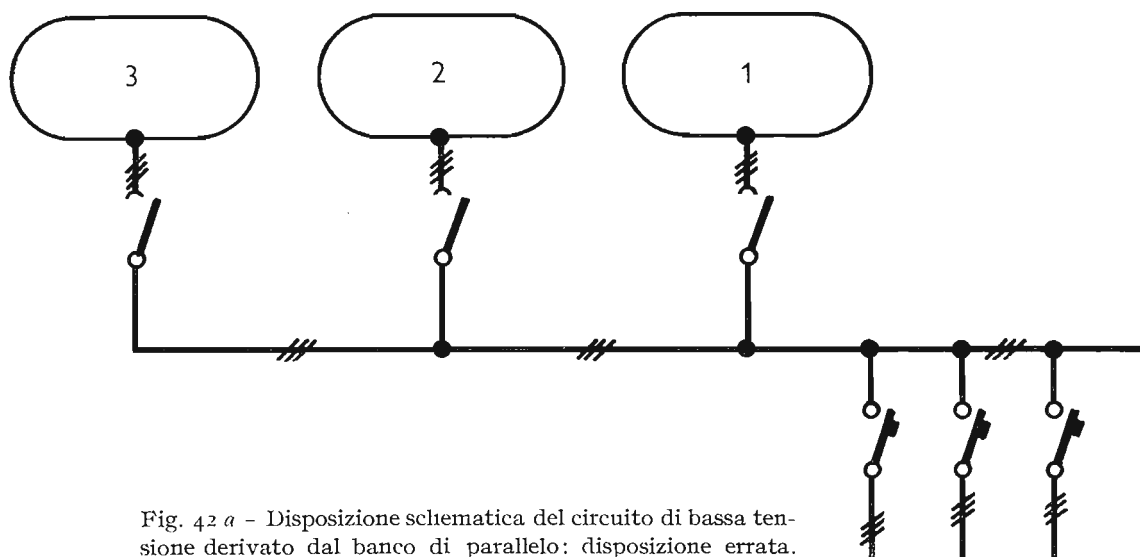



Fig. 42 *a* - Disposizione schematica del circuito di bassa tensione derivato dal banco di parallelo: disposizione errata.

Costruire un banco di parallelo come quello rappresentato schematicamente nella fig. 42 *a*, costituisce un errore tecnico di notevole importanza poichè il trasformatore 1 tenderà a sovraccaricarsi mentre il trasformatore 3 parteciperà al carico in modo inversamente proporzionale alla impedenza del collegamento.

Nei casi generalmente rilevabili nella pratica nei quali le distanze fra le macchine sono essenzialmente costituite dall'ingombro longitudinale di queste, adottando sbarre o cavi di sezione univoca si ottiene con questo schema che mentre il trasformatore 1 è a pieno carico, il trasformatore 2 è al 90% e il trasformatore 3 al 65÷70% del valore nominale della corrente secondaria.

Nelle figg. 42 *b* e *c* sono rappresentate soluzioni tecnicamente accettabili.

Conduttori per l'unione dei trasformatori con le sbarre di parallelo

Abbiamo già detto che il collegamento può essere eseguito sia in cavo che in sbarra in relazione alla posizione dei trasformatori e del quadro di distribuzione predisposto nel locale.

I cavi possono essere indifferentemente unipolari o pluripolari, le sbarre possono essere sia di rame che d'alluminio.

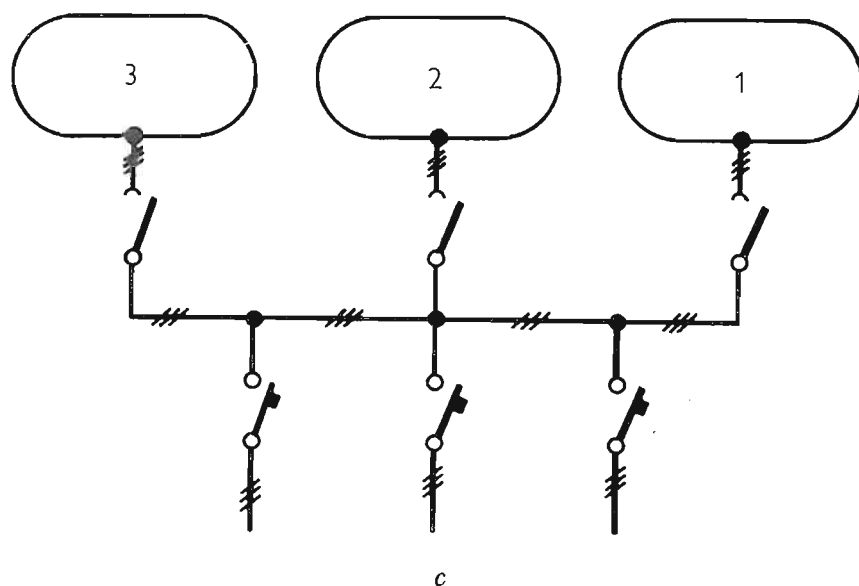
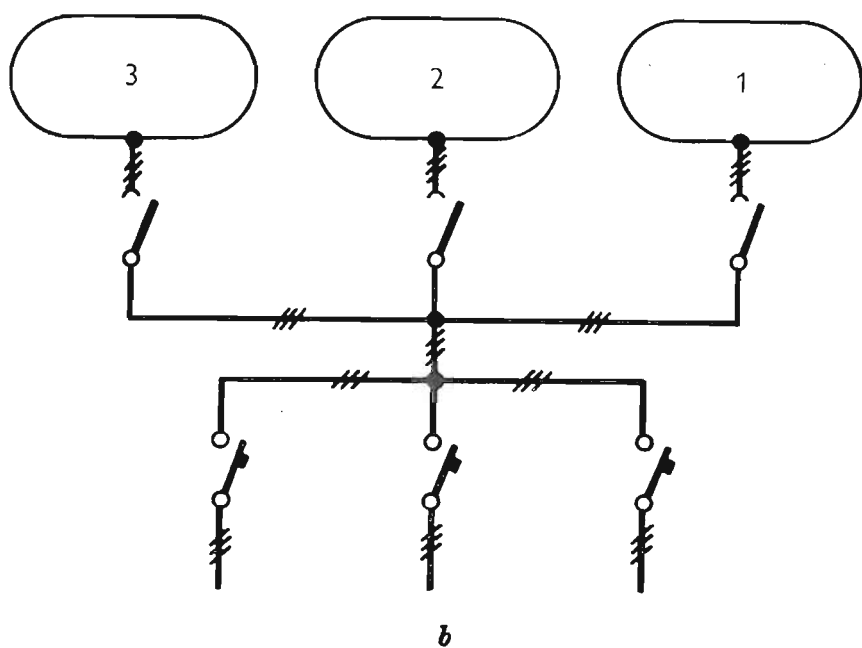



Fig. 42 *b-c* Disposizione schematica del circuito di bassa tensione derivato dal banco di parallelo: disposizioni tecnicamente corrette.

Nel caso di percorsi non rettilinei o di spazi ridotti è consigliabile adottare i conduttori prefabbricati isolsbarra (fig. 43) che il fabbricante può fornire a disegno, sagomandoli secondo le necessità.

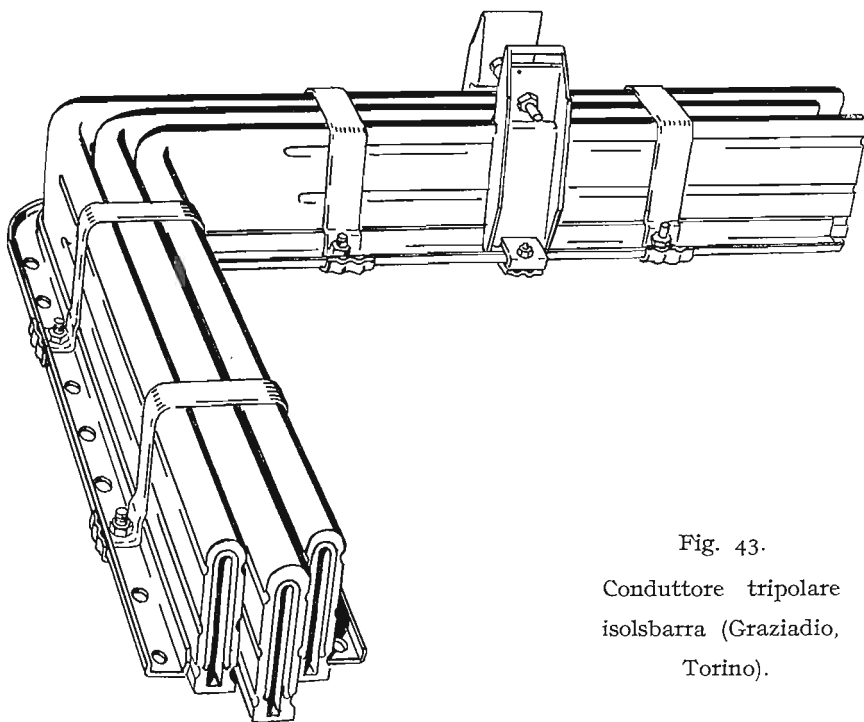



Fig. 43.
Conduttore tripolare isolsbarra (Graziadio, Torino).

L'uso di questi conduttori, formati da lamine di rame piegate a U e rivestite da una protezione isolante in resine fenoliche, rappresenta un notevole vantaggio in quanto riunisce le doti di rigidità dei conduttori in sbarra e quelle d'isolamento proprie dei cavi, permettendo così anche percorsi accidentati senza necessità di giunzioni che, nei conduttori in sbarra, oltre a costituire un notevole onere di manodopera, rappresentano punti deboli che richiedono, specialmente per le sbarre di alluminio, una manutenzione accurata e continua.

Nelle tabelle 8, 9, 10, 11 riportiamo i valori di resistenza e di reattanza dei cavi unipolari e tripolari d'uso più comune in modo che il progettista, in base alla sezione e alla lunghezza, possa calcolare il valore d'impedenza del collegamento.

Nelle tabelle 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20 e 21, in funzione della sezione, del metodo di posa e del numero dei cavi sono riuniti i dati relativi alle portate massime in ampere.

Per le sbarre d'alluminio e di rame le massime portate ammissibili in funzione della sezione e del numero delle sbarre sono rilevabili nelle tabelle 22 e 23.

Per i conduttori isolsbarra i valori di portata delle sbarre nude di rame vanno moltiplicati per 1,2 per il maggiore potere disperdente del calore, dovuto, a parità di sezione, alla superficie notevolmente più grande che offrono al contatto con l'aria di raffreddamento.

TABELLA N. 8 – **Cavi unipolari sotto piombo. Resistenza** R **e reattanz**

1	2	3	4	5	6	7	8
Tensione esercizio ([1])		fino a 2 kV		6 kV		10 kV	
Sezione	Resistenza a 20 °C a c. c.						Resistenza
mm²	ohm/km	R	X	R	X	R	X
4	4,60	5,50	0,307	—	—	—	—
6,3	2,97	3,60	0,298	3,60	0,299	—	—
10	1,80	2,21	0,286	2,21	0,287	2,21	0,287
16	1,15	1,38	0,266	1,38	0,267	1,38	0,268
(20)	0,922	1,11	0,254	1,11	0,255	1 11	0,256
25	0,755	0,905	0,248	0,905	0,249	0,905	0,250
(32)	0,578	0,690	0,242	0,690	0,243	0,690	0,244
40	0,457	0,560	0,237	0,560	0,238	0,560	0,240
(50)	0,379	0,451	0,233	0,541	0,234	0,451	0,236
63	0,278	0,330	0,226	0,330	0,227	0,330	0,228
(80)	0,232	0,280	0,219	0,280	0,220	0,280	0,221
100	0,181	0,222	0,212	0,222	0,222	0,213	0,213
125	0,143	0,184	0,206	0,184	0,207	0,184	0,207
160	0,119	0,150	0,199	0,150	0,200	0,150	0,201
200	0,0932	0,122	0,191	0,122	0,192	0,122	0,193
250	0,0755	0,100	0,186	0,100	0,187	0,100	0,188
315	0,0565	0,085	0,181	0,085	0,182	0,085	0,183
400	0,0454	0,071	0,176	0,071	0,177	0,072	0,177
500	0,0373	0,065	0,170	0,065	0,170	0,067	0,171
630	0,0287	0,056	0,163	0,056	0,163	0,058	0,164
800	0,0236	0,051	0,152	0,051	0,152	0,052	0,153
1000	0,0181	0,046	0,145	0,046	0,146	0,047	0,147

NOTE:

1) *Resistenza*: I valori della resistenza R sono riferiti alla temperatura di esercizio a pieno carico e in essi sono compresi gli aumenti apparenti dovuti alle correnti parassite nei conduttori e nel tubo di piombo, aumenti calcolati in base alla frequenza di 50 Hz. La tabella vale solo per cavi con conduttori di rame.

I cavi si suppongono disposti in piano con 7-8 cm di distanza libera fra l'uno e l'altro. I tubi di piombo dei diversi cavi s'intendono collegati fra loro in corto circuito

alla frequenza di 50 Hz. (Cavi con conduttori di rame) (Pirelli)

9	10	11	12	13	14	15	16
15 kV		20 kV		30 kV		60 kV	
reattanza G in ohm/km per fase							
R	X	R	X	R	X	R	X
—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—
1,04	0,257	—	—	—	—	—	—
0,830	0,251	—	—	—	—	—	—
0,671	0,245	0,659	0,246	—	—	—	—
0,554	0,241	0,554	0,242	—	—	—	—
0,445	0,237	0,443	0,238	0,452	0,240	—	—
0,326	0,229	0,325	0,231	0,330	0,233	—	—
0,276	0,222	0,268	0,244	0,270	0,228	—	—
0,221	0,214	0,220	0,215	0,228	0,220	—	—
0,184	0,208	0,185	0,209	0,185	0,214	0,187	0,221
0,150	0,202	0,151	0,204	0,152	0,208	0,154	0,215
0,123	0,194	0,123	0,196	0,124	0,198	0,127	0,203
0,100	0,189	0,101	0,190	0,102	0,191	0,105	0,199
0,085	0,184	0,086	0,185	0,087	0,186	0,090	0,191
0,072	0,178	0,073	0,178	0,075	0,180	0,080	0,184
0,067	0,172	0,068	0,173	—	—	—	—
0,058	0,164	—	—	—	—	—	—
0,053	0,154	—	—	—	—	—	—
0,048	0,148	—	—	—	—	—	—

e messi a terra a entrambe le estremità della linea.

2) *Reattanza*: I valori della reattanza X sono quelli fra fase e neutro e valgono per una distanza di 7-8 cm fra i cavi disposti come sopra.

Se la frequenza f è diversa da 50 Hz, moltiplicare X per $f/50$.

(1) Si intende come tensione tra le fasi in sistema trifase.
I cavi unipolari per corrente alternata non sono armati.

TABELLA N. 9 – **Cavi tripolari sotto piombo armato. Resistenza** R **e reattanza** X

1	2	3	4	5	6	7
Tensione di esercizio (¹)			fino a 2 kV		6 kV	
Sezione	Resistenza a 20 °C a c. c.		Resistenza R			
mm²	rotondi ohm/km	settorali ohm/km	R	X	R	X
2,5	7,26	—	8,7	0,110	—	—
4	4,65	—	5,6	0,101	—	—
6,3	3,00	—	3,6	0,095	3,6	0,116
10	1,82	1,85	2,24	0,092	2,24	0,107
16	1,16	1,16	1,40	0,089	1,40	0,102
(20)	0,932	0,924	1,11	0,087	1,11	0,100
25	0,762	0,739	0,890	0,079	0,890	0,090
(32)	0,584	0,587	0,705	0,076	0,705	0,083
40	0,461	0,462	0,563	0,075	0,563	0,082
(50)	0,382	0,370	0,448	0,074	0,448	0,080
63	0,281	0,293	0,360	0,073	0,360	0,079
(80)	0,234	0,231	0,283	0,072	0,283	0,078
100	0,183	0,185	0,225	0,071	0,225	0,077
125	0,144	0,148	0,181	0,071	0,181	0,076
160	0,120	0,116	0,148	0,071	0,147	0,073
200	0,0941	0,0924	0,117	0,071	0,117	0,072
250	0,0762	0,0739	0,096	0,071	0,096	0,072
315	0,0571	0,0587	0,081	0,071	0,081	0,072
400	0,0459	0,0462	0,068	0,071	0,068	0,072

NOTE:

1) *Resistenza*: I valori della resistenza R sono riferiti alla temperatura d'esercizio a pieno carico e in essi sono compresi gli aumenti apparenti dovuti alle correnti parassite nei conduttori, nel tubo di piombo e nell'armatura a nastri di ferro, aumenti calcolati in base alla frequenza di 50 Hz. La tabella vale solo per cavi con conduttori di rame.

2) *Reattanza*: I valori della reattanza X fra fase e neutro comprendono l'aumento

la frequenza di 50 Hz. (Cavi con conduttori di rame) (Pirelli).

8	9	10	11	12	13	14	15
10 kV		15 kV		20 kV		30 kV	
reattanza X in ohm/km per fase							
R	X	R	X	R	X	R	X
—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—
2,24	0,121	—	—	—	—	—	—
1,40	0,112	1,37	0,122	—	—	—	—
1,11	0,108	1,10	0,117	—	—	—	—
0,890	0,098	0,916	0,107	0,915	0,132	—	—
0,705	0,090	0,700	0,098	0,655	0,122	—	—
0,563	0,088	0,550	0,096	0,548	0,119	—	—
0,448	0,086	0,438	0,094	0,435	0,115	0,432	0,156
0,360	0,084	0,356	0,091	0,319	0,112	0,313	0,153
0,283	0,084	0,279	0,090	0,264	0,110	0,256	0,148
0,225	0,082	0,220	0,086	0,218	0,105	0,217	0,142
0,181	0,081	0,179	0,085	0,179	0,103	0,175	0,138
0,147	0,078	0,143	0,083	0,145	0,100	0,142	0,134
0,116	0,077	0,112	0,082	0,115	0,098	0,114	0,130
0,095	0,076	0,090	0,080	0,090	0,096	—	—
0,080	0,075	0,076	0,080	—	—	—	—
0,068	0,075	—	—	—	—	—	—

dovuto all'armatura di ferro. I cavi s'intendono con conduttori settoriali per le sezioni non inferiori a 10 mm² per tensioni fino a 6 kV, a 20 mm² per 10 kV e a 32 mm² oltre i 10 kV e fino a 15 kV, con conduttori rotondi negli altri casi. Se la frequenza f è diversa da 50 Hz, moltiplicare X per $f/50$.

(1) La tensione s'intende fra le fasi in sistema trifase.
I cavi a 30 kV s'intendono del tipo HTLS.

TABELLA N. 10 – **Cavi unipolari sotto piombo. Resistenza R e reattanza**

1	2	3	4	5	6	7	8
Tensione esercizio (1)		fino a 2 kV		6 kV		10 kV	
Sezione	Resistenza a 20 °C a c. c.	Resistenza R					
mm²	ohm/km	R	X	R	X	R	X
16	1,86	2,240	0,266	2,240	0,267	2,240	0,268
(20)	1,50	1,805	0,254	1,805	0,255	1,805	0,256
25	1,22	1,503	0,248	1,503	0,249	1,503	0,250
(32)	0,933	1,122	0,242	1,122	0,243	1,122	0,244
40	0,737	0,887	0,237	0,887	0,238	0,890	0,240
(50)	0,597	0,722	0,233	0,722	0,234	0,723	0,236
63	0,449	0,543	0,226	0,543	0,227	0,544	0,228
(80)	0,374	0,455	0,219	0,455	0,220	0,456	0,221
100	0,293	0,358	0,212	0,359	0,213	0,360	0,213
125	0,230	0,282	0,206	0,282	0,207	0,283	0,207
160	0,192	0,237	0,199	0,238	0,200	0,239	0,201
200	0,150	0,190	0,191	0,190	0,192	0,191	0,193
250	0,122	0,157	0,186	0,157	0,187	0,158	0,188
315	0,0912	0,120	0,181	0,120	0,182	0,121	0,183
400	0,0733	0,101	0,176	0,102	0,177	0,103	0,177
500	0,0602	0,092	0,170	0,092	0,170	0,094	0,171
630	0,064	0,077	0,163	0,077	0,163	0,079	0,164
800	0,0381	0,068	0,152	0,070	0,153	0,070	0,152
1000	0,0292	0,059	0,146	0,059	0,146	0,061	0,147

NOTE:

1) *Resistenza*: I valori della resistenza R sono riferiti alla temperatura d'esercizio a pieno carico e in essi sono compresi gli aumenti apparenti dovuti alle correnti parassite nei conduttori e nel tubo di piombo, aumenti calcolati in base alla frequenza di 50 Hz. La tabella vale solo per cavi con conduttori di alluminio.

I cavi si suppongono disposti in piano con 7-8 cm di distanza libera fra l'uno e

alla frequenza di 50 Hz. (Cavi con conduttori di alluminio) (Pirelli).

9	10	11	12	13	14	15	16
15 kV		20 kV		30 kV		60 kV	
reattanza X in ohm/km per fase							
R	X	R	X	R	X	R	X
—	—	—	—	—	—	—	—
1,770	0,257	—	—	—	—	—	—
1,440	0,251	—	—	—	—	—	—
1,100	0,245	1,100	0,246	—	—	—	—
0,876	0,241	0,877	0,242	—	—	—	—
0,712	0,237	0,713	0,238	0,705	0,240	—	—
0,535	0,229	0,563	0,231	0,535	0,233	—	—
0,445	0,222	0,446	0,224	0,447	0,228	—	—
0,356	0,214	0,357	0,215	0,354	0,220	—	—
0,273	0,208	0,273	0,209	0,282	0,214	0,282	0,221
0,237	0,202	0,238	0,204	0,239	0,208	0,237	0,215
0,188	0,194	0,188	0,196	0,190	0,198	0,193	0,203
0,160	0,189	0,161	0,190	0,160	0,191	0,162	0,199
0,124	0,184	0,125	0,185	0,124	0,186	0,128	0,191
0,103	0,178	0,105	0,178	0,105	0,180	0,108	0,185
0,094	0,172	0,094	0,173	—	—	—	—
0,079	0,164	—	—	—	—	—	—
0,070	0,152	—	—	—	—	—	—
0,061	0,148	—	—	—	—	—	—

l'altro. I tubi di piombo dei diversi cavi s'intendono collegati fra loro in corto circuito e messi a terra a entrambe le estremità della linea.

2) *Reattanza*: I valori della reattanza X sono quelli fra fase e neutro e valgono per una distanza di 7-8 cm fra i cavi disposti come sopra.

Se la frequenza f è diversa da 50 Hz, moltiplicare X per $f/50$.

(1) Si intende come tensione tra le fasi in sistema trifase.
I cavi unipolari per corrente alternata non sono armati.

TABELLA N. 11 – **Cavi tripolari sotto piombo armato. Resistenza *R* e reattanza**

1	2	3	4	5	6	7
Tensione di esercizio (1)			fino a 2 kV		6 kV	
Sezione	Resistenza a 20 °C a c. c.		Resistenza *R*			
mm²	rotondi ohm/km	settorali ohm/km	*R*	*X*	*R*	*X*
16	1,88	—	2,260	0,089	2,260	0,102
(20)	1,52	—	1,825	0,087	1,825	0,100
25	1,23	—	1,473	0,079	1,473	0,090
(32)	0,942	0,947	1,140	0,076	1,140	0,083
40	0,744	0,746	0,899	0,075	0,899	0,082
(50)	0,603	0,597	0,718	0,074	0,718	0,080
63	0,453	0,474	0,570	0,073	0,570	0,079
(80)	0,378	0,373	0,451	0,072	0,451	0,078
100	0,296	0,298	0,361	0,071	0,361	0,077
125	0,233	0,239	0,290	0,071	0,290	0,076
160	0,194	0,186	0,277	0,071	0,277	0,073
200	0,152	0,149	0,180	0,071	0,180	0,072
250	0,123	0,119	0,148	0,071	0,148	0,072
315	0,0921	0,0947	0,121	0,071	0,121	0,072
400	0,0740	0,0746	0,0988	0,071	0,0988	0,072

NOTE:

1) *Resistenza*: I valori della resistenza *R* sono riferiti alla temperatura d'esercizio a pieno carico e in essi sono compresi gli aumenti apparenti dovuti alle correnti parassite nei conduttori e nel tubo di piombo e nell'armatura a nastri di ferro, aumenti calcolati in base alla frequenza di 50 Hz. La tabella vale solo per cavi con conduttori di alluminio.

2) *Reattanza*: I valori della reattanza *X* fra fase e neutro comprendono l'aumento

alla frequenza di 50 Hz. (Cavi con conduttori di alluminio) (Pirelli).

8	9	10	11	12	13	14	15
10 kV		15 kV		20 kV		30 kV	
reattanza X in ohm/km per fase							
R	X	R	X	R	X	R	X
2,260	0,112	2,220	0,122	—	—	—	—
1,825	0,108	1,801	0,117	—	—	—	—
1,473	0,098	1,457	0,107	1,457	0,132	—	—
1,140	0,090	1,121	0,098	1,115	0,122	—	—
0,899	0,088	0,883	0,096	0,880	0,119	—	—
0,718	0,086	0,707	0,094	0,715	0,115	0,700	0,156
0,570	0,084	0,561	0,091	0,536	0,112	0,534	0,153
0,451	0,084	0,442	0,090	0,448	0,110	0,446	0,148
0,361	0,082	0,354	0,086	0,351	0,105	0,351	0,142
0,289	0,081	0,286	0,085	0,286	0,103	0,279	0,138
0,227	0,078	0,223	0,083	0,235	0,100	0,231	0,134
0,180	0,077	0,181	0,082	0,184	0,098	0,185	0,130
0,148	0,076	0,147	0,080	0,147	0,096	—	—
0,121	0,075	0,118	0,080	—	—	—	—
0,0989	0,075	—	—	—	—	—	—

dovuto all'armatura di ferro. I cavi s'intendono con conduttori settorali per le sezioni non inferiori a 10 mm² per tensione fino a 6 kV, a 20 mm² per tensione fino a 10 kV e a 32 mm² per tensione oltre i 10 kV e fino a 15 kV, con conduttori rotondi negli altri casi.

Se la frequenza f è diversa da 50 Hz, moltiplicare X per $f/50$.

---

(1) La tensione s'intende fra le fasi in sistema trifase.
I cavi a 30 kV s'intendono del tipo HTLS.

TABELLA N. 12 – **Portata (in ampere) dei cavi unipolari con conduttori di rame per corrente alternata.** Norme CEI.

Sezione nominale mm^2	fino a 2 kV		fino a 10 kV		fino a 20 kV		fino a 30 kV		fino a 60 kV	
	interrati	in aria	interrati	in aria	interrati	in aria	interrati	in aria	interrati	in aria
5	65	60	—	—	—	—	—	—	—	—
8	80	70	—	—	—	—	—	—	—	—
10	95	85	85	75	—	—	—	—	—	—
16	115	105	105	95	—	—	—	—	—	—
20	130	120	115	105	—	—	—	—	—	—
25	145	135	130	120	120	115	—	—	—	—
30	160	150	145	135	135	130	—	—	—	—
35	175	165	160	150	145	140	135	125	—	—
40	190	180	170	160	155	150	145	135	—	—
50	215	205	195	185	180	170	165	155	—	—
60	235	230	215	210	200	190	185	175	—	—
75	270	265	250	245	230	225	210	200	—	—
90	295	295	275	270	255	250	230	225	—	—
100	315	315	290	290	270	265	245	240	—	—
120	345	320	325	325	300	295	255	260	235	225
150	385	405	360	370	335	335	300	295	270	260
180	425	450	395	415	365	375	330	330	300	290
200	450	480	415	440	385	395	345	350	315	305
240	490	535	455	490	420	440	373	385	340	340
275	520	575	485	530	450	475	400	415	360	365
300	540	605	500	555	465	495	420	435	375	385
325	560	630	520	575	485	515	440	455	390	400
350	580	655	535	600	500	535	450	470	400	415
400	610	695	565	635	530	565	480	505	—	—
450	640	740	595	670	555	595	—	—	—	—
500	660	770	615	695	575	615	—	—	—	—
600	700	825	650	740	—	—	—	—	—	—

Si raccomanda di usare preferibilmente solo le sezioni stampate in grassetto.

Le portate indicate sono state calcolate ammettendo che i tubi di piombo dei cavi siano collegati in corto circuito e a terra ad entrambe le estremità della linea e che l'intervallo tra i cavi adiacenti sia di 7-8 cm.

TABELLA N. 13 – **Portata (in ampere) dei cavi unipolari con conduttori di alluminio per corrente alternata.** Norme CEI.

Sezione nominale mm^2	fino a 2 kV		fino a 10 kV		fino a 20 kV		fino a 30 kV		fino a 60 kV	
	interrati	in aria	interrati	in aria	interrati	in aria	interrati	in aria	interrati	in aria
5	50	47	—	—	—	—	—	—	—	—
8	63	55	—	—	—	—	—	—	—	—
10	75	67	67	60	—	—	—	—	—	—
12	82	73	73	65	—	—	—	—	—	—
16	90	83	83	75	—	—	—	—	—	—
20	100	95	90	83	—	—	—	—	—	—
25	115	105	100	95	90	90	—	—	—	—
30	125	115	110	105	100	100	—	—	—	—
35	135	130	125	115	110	110	105	110	—	—
40	145	140	130	125	120	115	115	110	—	—
50	165	160	150	145	140	130	125	120	—	—
60	185	180	170	165	155	150	140	135	—	—
75	210	205	195	190	180	175	165	155	—	—
90	230	230	215	215	200	195	180	175	—	—
100	245	245	225	225	210	205	190	185	—	—
120	270	275	250	255	235	230	200	205	185	175
150	305	320	285	295	265	255	235	235	215	205
180	335	355	310	325	290	295	260	260	235	230
200	360	380	330	350	305	315	275	280	250	245
240	390	430	365	390	335	350	300	305	270	270
275	420	465	390	425	360	380	320	335	290	295
300	435	485	400	445	375	400	340	350	300	310
325	455	510	420	465	390	415	355	370	315	325
350	475	535	435	490	410	435	365	385	325	340
375	485	550	450	505	420	450	380	400	—	—
400	500	570	465	520	435	465	395	415	—	—
450	530	610	490	550	455	490	—	—	—	—
500	550	640	510	575	475	505	—	—	—	—
600	590	690	540	615	—	—	—	—	—	—

Si raccomanda di usare preferibilmente solo le sezioni stampate in grassetto.

Le portate indicate sono state calcolate ammettendo che i tubi di piombo dei cavi siano collegati in corto circuito e a terra ad entrambe le estremità della linea e che l'intervallo tra i cavi adiacenti sia di 7 o 8 cm.

TABELLA N. 14 – **Portata (in ampere) dei cavi multipolari con cintura, con conduttori di rame, per corrente alternata fino a 2 kV.** Norme CEI.

Sezione nominale mm²	bipolari		tripolari	
	interrati	in aria	interrati	in aria
5	45	36	39	31
8	63	50	56	44
10	73	59	65	52
16	97	73	87	71
20	110	85	99	81
25	125	100	110	93
30	140	115	125	105
35	155	125	135	115
40	170	140	150	125
50	190	160	170	145
60	210	180	190	165
75	240	210	215	190
90	270	235	235	215
100	290	250	250	230
120	320	280	280	255
150	360	320	315	290
180	395	355	345	320
200	415	375	365	340
240	455	415	400	380
275	485	445	430	410
300	505	465	445	430
325	525	485	465	450
350	545	510	480	470
400	580	545	510	510

Si raccomanda di usare preferibilmente solo le sezioni stampate in grassetto.

Per i cavi a 3 ½ e 4 conduttori adoperati per linee trifasi con neutro valgono le portate dei cavi tripolari.

Le portate qui indicate valgono sia per cavi con conduttori rotondi, sia per cavi con conduttori settorali.

TABELLA N. 15 – **Portata (in ampere) dei cavi multipolari con cintura, con conduttori di alluminio, per corrente alternata fino a 2 kV.**

Norme CEI.

Sezione nominale mm^2	bipolari		tripolari	
	interrati	in aria	interrati	in aria
5	35	28	30	26
8	50	38	42	34
10	58	47	52	40
12	65	52	58	46
16	77	58	68	55
20	88	68	78	65
25	95	75	85	70
30	110	85	95	80
35	120	95	105	90
40	130	105	115	98
50	145	125	130	110
60	160	140	145	125
75	185	160	165	145
90	210	180	185	165
100	225	195	195	180
120	250	220	220	200
150	280	250	250	225
180	310	280	270	255
200	330	295	290	270
240	360	330	320	300
275	390	375	345	330
300	405	395	355	345
325	425	415	375	365
350	445	435	390	380
375	460	450	405	400
400	475	355	420	420

Si raccomanda di usare preferibilmente solo le sezioni stampate in grassetto.

Per i cavi a 3 ½ e 4 conduttori adoperati per linee trifasi con neutro valgono le portate dei cavi tripolari.

Le portate qui indicate valgono sia per cavi con conduttori rotondi, sia per cavi con conduttori settorali.

TABELLA N. 16 – **Portata dei cavi unipolari con conduttori di rame e isolati con gomma.** Norme CEI.

Sezione nominale mm²	Fino a 2 cavi raggruppati		3 o 4 cavi raggruppati		5 o 6 cavi raggruppati	
	in aria libera A	in tubi o cassette A	in aria libera A	in tubi o cassette A	in aria libera A	in tubi o cassette A
0,5	3	3	3	3	3	3
0,75	5	5	5	5	5	5
1	7	7	7	7	7	7
1,5	10	10	10	10	10	10
2	13	13	13	13	13	13
2,5	16	16	16	16	16	16
3	19	19	19	19	19	19
4	22	22	22	22	22	22
5	25	25	25	25	25	25
6	31	30	29	28	28	27
8	40	37	37	32	32	30
10	47	42	42	35	37	32
12	52	46	45	38	40	34
16	66	57	55	45	47	38
20	76	66	64	51	54	41
25	88	77	73	59	61	47
30	97	84	80	64	68	51
35	108	94	90	71	75	56
40	116	100	96	76	80	60
50	135	114	115	90	95	70
60	150	125	126	97	104	76
75	176	144	148	112	120	88
90	198	158	164	125	134	98
100	213	172	176	135	145	106
120	240	193	196	150	158	118
150	280	220	226	172	184	136
180	325	255	265	220	215	160

Si raccomanda di usare preferibilmente solo le sezioni stampate in grassetto. Per le sezioni superiori a 180 mm² vedi tabella 20.

TABELLA N. 17 – **Portata dei cavi unipolari con conduttori d'alluminio e isolati con gomma.** Norme CEI.

Sezione nominale mm²	Fino a 2 cavi raggruppati		3 o 4 cavi raggruppati		5 o 6 cavi raggruppati	
	in aria libera A	in tubi o cassette A	in aria libera A	in tubi o cassette A	in aria libera A	in tubi o cassette A
1,2	6	6	6	6	6	6
1,5	8	8	8	8	8	8
2	10	10	10	10	10	10
2,5	13	13	13	13	13	13
3	15	15	15	15	15	15
4	17	17	17	17	17	17
5	20	20	20	20	20	20
6	24	24	24	24	24	24
8	31	29	29	25	25	25
10	37	32	32	27	29	25
12	42	36	36	30	32	27
16	51	44	43	35	36	30
20	60	52	51	41	43	33
25	70	61	58	47	49	38
30	77	67	64	51	54	41
35	83	72	69	55	58	43
40	90	78	76	60	63	47
50	104	88	89	69	73	54
60	117	97	99	76	81	59
75	137	112	115	87	93	68
90	152	124	127	97	104	76
100	164	134	137	105	113	82
120	188	151	154	117	124	92
150	229	174	178	136	145	107
180	260	200	210	160	170	125

Si raccomanda di usare preferibilmente solo le sezioni stampate in grassetto.
Per le sezioni superiori a 180 mm² vedi tabella 20.

TABELLA N. 18 - **Portata dei cavi tripolari con conduttori di rame e isolati con gomma.** Norme CEI.

Sezione nominale mm²	Un solo cavo		2 o 3 cavi raggruppati		4, 5 o 6 cavi raggruppati	
	in aria libera A	in tubi o cassette A	in aria libera A	in tubi o cassette A	in aria libera A	in tubi o cassette A
0,5	3	3	3	3	3	3
0,75	5	5	5	5	5	5
1	7	7	7	7	7	7
1,5	10	10	10	10	10	10
2	13	13	13	13	13	13
2,5	16	16	16	16	16	16
3	19	19	19	19	19	19
4	22	22	22	22	22	22
5	25	25	25	25	25	25
6	30	29	29	28	27	27
8	36	34	34	32	29	28
10	40	37	37	34	31	29
12	44	40	40	36	33	30
16	51	45	44	40	37	32
20	59	51	50	45	40	34
25	69	68	58	51	45	36
30	75	65	64	56	49	38
35	84	73	72	64	53	41
40	89	76	76	67	56	43
50	105	89	90	76	66	49
60	115	96	100	82	72	53
75	135	112	118	96	83	62
90	152	123	131	105	92	68
100	165	133	142	114	100	74
120	186	150	160	128	111	83
150	217	172	186	147	128	93
180	245	195	210	165	145	105
200	260	205	220	175	155	112

Si raccomanda di usare preferibilmente solo le sezioni stampate in grassetto.

TABELLA N. 19 – **Portata dei cavi tripolari con conduttori di alluminio e isolati con gomma.** Norme CEI.

Sezione nominale mm²	Un solo cavo		2 o 3 cavi raggruppati		4, 5 o 6 cavi raggruppati	
	in aria libera A	in tubi o cassette A	in aria libera A	in tubi o cassette A	in aria libera A	in tubi o cassette A
1,2	6	6	6	6	6	6
1,5	8	8	8	8	8	8
2	10	10	10	10	10	10
2,5	13	13	13	13	13	13
3	15	15	15	15	15	15
4	17	17	17	17	17	17
5	20	20	20	20	20	20
6	24	24	24	24	23	22
8	28	27	27	25	23	22
10	31	29	29	27	25	23
12	35	32	32	29	27	24
16	40	36	35	31	29	25
20	47	40	39	36	32	27
25	55	48	46	40	36	29
30	60	52	51	45	39	30
35	65	56	55	49	41	31
40	71	60	60	52	44	33
50	81	68	69	58	51	38
60	90	75	78	64	56	42
75	104	87	91	74	64	48
90	119	97	103	83	72	54
100	128	104	111	89	78	58
120	145	117	125	100	86	65
150	170	135	146	115	100	73
180	195	155	165	130	115	85
200	207	165	175	138	122	90

Si raccomanda di usare preferibilmente solo le sezioni stampate in grassetto.

TABELLA N. 20 - **Portata dei cavi unipolari di grande sezione con conduttori di rame, e isolati con gomma (due o tre cavi in aria libera).** Norme CEI.

Sezione nominale mm²	Corrente continua Cavi sotto treccia tessile o sotto tubo di piombo A	Corrente alternata: Cavi sotto treccia tessile A	Corrente alternata: Cavi sotto tubo di piombo A
200	380	375	375
240	430	425	420
275	470	460	455
300	500	485	475
350	550	530	520
400	600	580	560
450	650	620	595
500	700	660	630
670	850	810	725

Si raccomanda di usare preferibilmente solo le sezioni stampate in grassetto.

TABELLA N. 21 – **Portata dei cavi unipolari di grande sezione con conduttori di alluminio e isolati con gomma (due o tre cavi in aria libera).** Norme CEI.

Sezione nominale mm²	Corrente continua Cavi sotto treccia tessile o sotto tubo di piombo A	Corrente alternata: Cavi sotto treccia tessile A	Corrente alternata: Cavi sotto tubo di piombo A
200	300	300	300
250	335	330	330
275	365	360	360
300	390	380	380
350	430	420	415
400	470	460	450
450	505	490	480
500	545	530	510
670	660	640	605

Si raccomanda di usare preferibilmente solo le sezioni stampate in grassetto.

TABELLE N. 22 – **Caratteristiche dimensionali delle sbarre piatte di rame elettrolitico e correnti in esse ammissibili.**
(Norme CEI - 7 - 4 fascic. 47).

Larghezza e spessore	Sezione teorica	Peso per la sezione teorica	Intensità di corrente ammissibile in ampere (per correnti continue e correnti a frequenze industriali)			
mm	mm²	kg/m	1 Sbarra	2 Sbarre	3 Sbarre	4 Sbarre
10 × 2	20	0,178	85	—	—	—
12 × 2	24	0,214	100	—	—	—
15 × 2	30	0,267	115	—	—	—
20 × 2	40	0,356	150		—	—
10 × 3	30	0,267	105	—	—	—
15 × 3	45	0,401	165	—	—	—
20 × 3	60	0,534	200	—	—	—
25 × 3	75	0,668	235	—	—	—
30 × 3	90	0,801	280	—	—	—
40 × 3	120	1,068	355	—	—	—
20 × 4	80	0,712	235	—	—	—
25 × 4	100	0,890	280	—	—	—
30 × 4	120	1,068	300	—	—	—
40 × 4	160	1,424	385	—	—	—
50 × 4	200	1,780	455	—	—	—
20 × 5	100	0,890	280	515	710	895
25 × 5	125	1,113	334	600	830	1035
30 × 5	150	1,335	365	635	930	1160
40 × 5	200	1,780	450	775	1140	1440
50 × 5	250	2,225	555	1020	1420	1780
60 × 5	300	2,670	640	1190	1640	2070
80 × 5	400	3,500	830	1530	2125	2670
100 × 5	500	4,450	1035	1900	2650	3320

segue

seguito

Larghezza e spessore mm	Sezione teorica mm^2	Peso per la sezione teorica kg/m	Intensità di corrente ammissibile in ampere (per correnti continue e correnti alternate a frequenze industriali)			
			1 Sbarra	2 Sbarre	3 Sbarre	4 Sbarre
40 × 6	240	2,140	510	940	1315	1650
50 × 6	300	2,670	605	1110	1560	1960
60 × 6	360	3,204	710	1305	1830	2300
80 × 6	480	4,272	1010	1875	2630	3300
100 × 6	600	5,340	1130	2460	2920	3660
40 × 8	320	2,848	585	1075	1510	1885
50 × 8	400	3,560	705	1295	1820	2290
60 × 8	480	4,272	830	1525	2140	2690
80 × 8	640	5,696	1185	2180	3060	3840
100 × 8	800	7,120	1300	2390	3350	4220
120 × 8	960	8,544	1515	2810	3910	4920
60 × 10	600	5,340	940	1730	2410	3030
80 × 10	800	7,120	1185	2180	3030	3790
100 × 10	1000	8,900	1450	2670	3710	4660
120 × 10	1200	12,820	1715	3150	4390	5490

NOTE:

1 - Le lunghezze di fabbricazione variano da 4 a 7 m.
2 - Il carico di rottura del rame ricotto è di 20 kg/mm^2, indipendentemente dalla sezione. Per il rame normale il carico di rottura però varia da 30 kg/mm^2 per le piccole sezioni (10 × 2 - 10 × 3) a 24 kg/mm^2 per le grandi sezioni (da 80 × 5 a 120 × 10).
3 - Le intensità di corrente ammissibili sopra indicate sono valide per sbarre disposte con l'asse maggiore verticale. Per sbarre disposte orizzontalmente moltiplicare i valori per i seguenti coefficienti: 0,85÷0,82 per una sbarra; 0,80÷0,75 per due sbarre; 0,71÷0,66 per 3 sbarre; 0,53÷0,54 per quattro sbarre.
4 - Per sbarre multiple l'intervallo fra le sbarre deve essere uguale allo spessore di una sbarra.
5 - I valori delle intensità di corrente ammissibili sono validi per sbarre non verniciate, per un riscaldamento di 30 °C sulla temperatura ambiente (ammessa di 40 °C), in ambiente con aria calma non limitata.
6 - Per sbarre verniciate con vernici scure i valori possono essere aumentati dal 5 al 7%.

TABELLA N. 23 – **Caratteristiche dimensionali delle sbarre piatte di alluminio al 99,5% e correnti in esse ammissibili.**

(Norme CEI - 7 - 4 - fascic. 47).

Larghezza e spessore	Sezione teorica	Peso per la sezione teorica	Intensità di corrente ammissibile in ampere (per correnti continue e correnti alternate a frequenze industriali)			
mm	mm²	kg/m	1 Sbarra	2 Sbarre	3 Sbarre	4 Sbarre
12 × 2	24	0,065	80	—	—	—
15 × 2	30	0,081	90	—	—	—
20 × 2	40	0,108	120	—	—	—
15 × 3	45	0,122	130	—	—	—
20 × 3	60	0,162	160	—	—	—
25 × 3	75	0,203	185	—	—	—
30 × 3	90	0,243	220	—	—	—
40 × 3	120	0,234	280	—	—	
25 × 4	100	0,270	220	—	—	—
30 × 4	120	0,324	240	—	—	—
40 × 4	160	0,432	305	—	—	—
50 × 4	200	0,540	360	—	—	—
30 × 5	150	0,405	290	505	740	930
40 × 5	200	0,540	355	615	905	1140
50 × 5	250	0,675	440	810	1125	1410
60 × 5	300	0,810	510	940	1300	1640
80 × 5	400	1,080	660	1215	1685	2120
100 × 5	500	1,350	820	1510	2100	2630
50 × 6	300	0,810	480	880	1240	1555
60 × 6	360	0,972	565	1040	1455	1830
80 × 6	480	1,296	800	1490	2090	2620
100 × 6	600	1,620	895	1950	2320	2900

segue

seguito

Larghezza e spessore	Sezione teorica	Peso per la sezione teorica	Intensità di corrente ammissibile in ampere (per correnti continue e correnti alternate a frequenze industriali)			
mm	mm²	kg/m	1 Sbarra	2 Sbarre	3 Sbarre	4 Sbarre
50 × 8	400	1,080	560	1030	1445	1815
60 × 8	480	1,296	660	1210	1700	2140
80 × 8	640	1,728	940	1730	2420	3050
100 × 8	800	2,160	1030	1890	2660	3340
120 × 8	960	2,592	1200	2210	3100	3890
60 × 10	600	1,620	745	1370	1900	2400
80 × 10	800	2,160	940	1730	2400	3000
100 × 10	1000	2,700	154	2120	2940	3700
120 × 10	1200	3,240	1360	2500	3480	4350

NOTE:

1 - Le lunghezze di fabbricazione variano da 4 a 7 m.

2 - Il carico di rottura dell'alluminio laminato o trafilato è di 7 kg/mm² indipendentemente dalla sezione.

3 - Le intensità di corrente ammissibili sopra indicate sono valide per sbarre con l'asse maggiore verticale. Per sbarre disposte orizzontalmente moltiplicare i valori per i seguenti coefficienti: 0,85÷0,82 per una sbarra; 0,80÷0,75 per due sbarre; 0,71÷0,66 per tre sbarre; 0,53÷0,54 per quattro sbarre.

4 - Per sbarre multiple l'intervallo fra le sbarre deve essere uguale allo spessore di una sbarra.

5 - I valori delle intensità di corrente ammissibili sono validi per sbarre non verniciate, per un riscaldamento di 30 °C sulla temperatura ambiente (ammessa di 40 °C), in ambiente con aria calma non limitata.

6 - Per sbarre verniciate con vernici scure i valori possono essere aumentati dal 5 al 7%.

PARTE SECONDA

CRITERI DI DIMENSIONAMENTO, D'INSTALLAZIONE E DI PROTEZIONE DEI TRASFORMATORI

CAPITOLO I

CRITERI DI DIMENSIONAMENTO

Nella stesura del progetto di un impianto elettrico i criteri di dimensionamento delle macchine delle apparecchiature e dei conduttori assumono un'importanza notevolissima, poichè coinvolgono i due principali fattori che stanno alla base della progettazione, ossia la funzionalità e il costo.

È evidente che un impianto largamente dimensionato può anche essere funzionale, qualora non vengano superati certi limiti oltre i quali possono aversi effetti negativi; è però altresì evidente che l'onere risultante non possa essere giustificabile, quindi è necessario arrivare a stabilire un punto d'intersezione fra funzionalità e onere, tale che soddisfi, sia la parte tecnica che quella economica, tenendo presente che si definisce un buon tecnico colui che riesce a progettare o a costruire un impianto completamente funzionale nella maniera più economica.

Nei riguardi dei trasformatori, onde arrivare ad un valore ragionato della potenza da assegnare alla macchina o alle macchine da installare nella cabina, occorre che il tecnico progettista abbia ben chiari nella mente i seguenti concetti di:

- fattore di utilizzazione;
- fattore di contemporaneità;
- fattore di potenza

in modo che partendo dal valore di potenza degli utilizzatori installati, possa arrivare a stabilire, con cognizione di causa, il valore della potenza contemporanea assorbibile dall'impianto e quindi definire, in via economica, il dimensionamento dei trasformatori.

Fattore di utilizzazione

Si definisce «fattore di utilizzazione» quel coefficiente che, tenendo conto dell'effettiva prestazione di un utilizzatore rispetto alla sua potenza nominale, stabilisce la potenza massima assorbita dall'impianto di alimentazione.

Il valore di questo coefficiente varia in relazione alla natura dell'utilizzatore, infatti, mentre un forno a resistenza avrà un fattore d'utilizzazione uguale all'unità, in quanto la potenza massima assorbita è certamente uguale a quella nominale, per i motori, generalmente calcolati in modo da superare senza danno anche eventuali sovraccarichi transitori della macchina dipendente, il valore della potenza massima effettivamente utilizzata, rispetto alla nominale del motore, difficilmente supererà l'80%, con un coefficiente d'utilizzazione di 0,8.

Fattore di contemporaneità

Il fattore d'utilizzazione che abbiamo appena definito, indica il valore massimo di potenza che l'utilizzatore assorbe dalla rete di alimentazione quando lavora a pieno carico, ma è evidente che durante il ciclo lavorativo si avranno periodi di assorbimento a pieno carico seguiti da periodi di assorbimento a carico minore, ed è altresì evidente che, avendo in funzione un certo numero di utilizzatori uguali, la contemporaneità di quelli che assorbono il massimo carico divenga tanto minore quanto è maggiore il loro numero; quindi per «fattore di contemporaneità» si intende quel coefficiente che esprime, per un certo gruppo di utilizzatori, la possibilità dell'assorbimento massimo contemporaneo.

Potenza massima contemporanea assorbibile

Una volta determinati i valori dei coefficienti di utilizzazione e di contemporaneità, per stabilire il valore della potenza massima che deve essere messa a disposizione del gruppo di utilizzatori considerato, sarà sufficiente moltiplicare il valore totale della potenza nominale ottenuto dalla somma delle potenze singole per il prodotto ottenuto moltiplicando i due coefficienti trovati.

Fattore di potenza

Tutti gli utilizzatori elettrici basati su fenomeni magnetici, motori, trasformatori, ecc., assorbono, indipendentemente dal carico, una certa quantità di corrente necessaria per stabilire e mantenere il fenomeno di magnetizzazione dei nuclei che sta alla base del funzionamento.

Com'è noto questo carico, nettamente induttivo, suppone l'assorbimento di una corrente sfasata di circa 90° in ritardo con la tensione e determina il fenomeno dello sfasamento fra corrente e tensione e conseguentemente l'assorbimento di una potenza reattiva o potenza swattata.

TABELLA N. 24 - **Coefficienti pratici di utilizzazione e di contemporaneità negli impianti di forza motrice.**

Utilizzatori / Valori dei coefficienti	Forni a resistenza. Essiccatoi caldaie per la produzione di vapore	Forni a induzione	Motori da 0,5 a 2 kW	Motori da 2,5 a 10 kW	Motori da 10,5 a 30 kW	Motori oltre 30 kW	Raddrizzatori, di qualsiasi tipo	Saldatrici elettriche
Fattore di utilizzaz.	1	1	1	0,7	0,8	0,8	1	1
Fattore di contemporaneità	1 salvo precisazioni dell'utente	1 salvo precis. utente	per 10 motori 0,6 per 20 motori 0,5 per 50 motori 0,4	per 10 motori 0,7 per 20 motori 0,6 per 50 motori 0,45	per 5 motori 0,8 per 10 motori 0,65 per 20 motori 0,5	per 2 motori 0,9 per 5 motori 0,7 per 10 motori 0,6	per 4 raddrizzatori 0,9 per 8 raddrizzatori 0,8 per 15 raddrizzatori 0,7	per 4 saldatrici 0,45 per 10 saldatrici 0,4 per 20 saldatrici 0,3

Il valore della potenza reattiva assorbita dipende dalle caratteristiche costruttive dell'utilizzatore e rimane invariato qualunque siano le condizioni di carico, quindi l'angolo di sfasamento fra corrente e tensione

TABELLA N. 25 – **Coefficienti per la valutazione del carico convenzionale (1) delle unità di impianto.**

	1	2	3	4	5	6
1		Illuminazione	Scaldacqua	Cucina	Servizi vari, comprese le prese a spina (per queste la potenza è quella corrispondente alla corrente nominale)	Ascensori (la potenza è quella corrispondente alla corrente di targa)
2	Appartamenti d'abitazione	0,65	1 per l'apparecchio di maggior potenza 0,75 per il secondo 0,50 per gli altri	1	0,25	(2)
3	Alberghi Ospedali Collegi	0,75	1 per l'apparecchio di maggior potenza 0,75 per il secondo 0,50 per il terzo 0,25 per gli altri	1 per l'apparecchio di maggior potenza 0,75 per gli altri	0,5	3 per il motore dell'ascensore di maggior potenza 1 per il successivo ascensore 0,7 per tutti gli altri ascensori
4	Uffici e negozi	0,90	1 per l'apparecchio di maggior potenza 0,75 per il secondo 0,50 per il terzo 0,25 per gli altri	--	0,5	3 per il motore dell'ascensore di maggior potenza 1 per il successivo ascensore 0,7 per tutti gli altri ascensori

(1) Per le derivazioni facenti capo a singoli apparecchi utilizzatori o a singole prese a spina si deve assumere, come valore del coefficiente, l'unità fatta eccezione per il caso degli ascensori.

(2) Per gli ascensori e gli altri servizi generali di edifici d'abitazione comuni, i dati relativi sono allo studio.

viene determinato dal valore della corrente relativa alla potenza attiva assorbita dall'utilizzatore, nei confronti della potenza reattiva, e sarà tanto maggiore quanto più l'utilizzatore si avvicinerà al funzionamento a vuoto.

Posta la questione in questi termini il valore del fattore di potenza, ossia il valore del coseno dell'angolo di sfasamento fra corrente e tensione di un impianto, dipenderà certamente dalle condizioni di utilizzazione delle macchine installate.

Le Aziende elettriche di distribuzione dell'energia permettono un valore medio mensile del fattore di potenza non inferiore a 0,8 ed è quindi evidente che qualora questo valore non potesse essere raggiunto, occorrerebbe introdurre nell'impianto elementi atti a modificare la situazione di fatto, rifasando il carico (1).

TABELLA N. 26 – **Valori di potenza installata presunta negli appartamenti di abitazione.**

	1	2
	per illuminazione	10 W per m^2 di superficie dell'appartamento col minimo di 500 W.
1	scaldacqua	1000 W per appartamenti fino a 4 locali (2) 2000 W per appartamenti oltre i 4 locali
3	cucina	da considerare solo se ne è prevista esplicitamente l'installazione
4	servizi vari	40 W per m^2 di superficie dell'appartamento, in zone urbane 20 W per m^2 di superficie dell'appartamento, in zone rurali

(1) Per maggiori precisazioni sugli impianti di rifasamento vedere E. COPPI, « *Impianti elettrici d'illuminazione e forza motrice* », Ed. Hoepli.

(2) Va considerato come locale ogni vano abitabile, con esclusione cioè di anticamere, corridoi, cucinino e bagno.

TABELLA N. 27 — **Coefficienti per la valutazione del carico convenzionale delle colonne montanti che alimentano appartamenti d'abitazione.**

Unità d'impianto alimentate	Coefficienti per la valutazione del carico convenzionale
1	1
2÷4	0,8
5÷10	0,5
11 e oltre	0,3

Perciò in tutte le considerazioni che faremo per la determinazione del dimensionamento dei trasformatori il valore del fattore di potenza sarà supposto non inferiore a 0,8.

I valori dei fattori di utilizzazione e di contemporaneità dovrebbero essere chiesti ai progettisti dell'officina o dello stabilimento, ma in genere, salvo quando di proposito una lavorazione esclude l'altra, l'informazione sarà di difficile acquisizione.

Per facilitare il compito del tecnico abbiamo riunito nella tabella 24 i valori dei fattori suddetti in rapporto alla qualità degli utilizzatori, mentre nelle tabelle 25, 26, 27, desunte dalle Norme CEI per gli impianti elettrici negli edifici civili, sono raccolti i dati che permettono il calcolo della potenza presunta in questo particolare caso.

Uso delle tabelle

I valori riportati nelle tabelle devono essere intesi come riferiti ai casi mediamente più frequenti e sono da usare quando manchi qualunque dato informativo. È naturale che il tecnico, prima di ricorrere alle tabelle, si informi, presso chi dovrà esercire l'impianto, sui cicli usuali di lavorazione, e faccia quanto è in suo potere per avvicinare i valori dei coefficienti, quanto più possibile, alla realtà specifica del caso che deve risolvere.

Dovendo usufruire delle tabelle nelle quali i valori esposti hanno carattere nettamente prudenziale occorrerà procedere, per gli impianti di forza motrice, come segue:

1) suddividere gli utilizzatori come è indicato nella tabella 24;

2) rilevare, per ogni gruppo, il coefficiente di utilizzazione e di contemporaneità indicato, interpolando quando manchi il valore cercato;

3) eseguire, per ogni gruppo, il prodotto dei due valori trovati;

4) eseguire il prodotto fra il valore trovato e la potenza, o la somma delle potenze nominali di ogni gruppo;

5) eseguire la somma dei valori trovati.

Facciamo un esempio pratico:

Si determini la potenza massima presunta che verrà assorbita da un complesso industriale comprendente i seguenti utilizzatori, tenendo conto che i forni di ricottura non sono in funzione quando vengono usati quelli di trattamento.

Forni di ricottura:	1	da	30	kW
	2	»	25	»
Forni di trattamento:	1	»	15	»
	1	»	10	»

Motori:	20	motori	trifase	da	1	kW	20	kW
	10	»	»	»	2	»	20	»
	5	»	»	»	3	»	15	»
	15	»	»	»	5	»	75	»
	2	»	»	»	20	»	40	»
	1	»	»	»	30	»	30	»
Saldatrici:	10	»	»	»	5	»	50	»

Avendo escluso a priori la contemporaneità nell'uso dei forni di trattamento e ricottura, nel calcolo della potenza massima presunta dovremo tener conto soltanto del gruppo che rappresenta il maggior valore di potenza (forni di ricottura), quindi, essendo la somma delle potenze singole uguale a 80 kW, e i fattori di utilizzazione e di contemporaneità uguali a 1, la potenza necessaria da prevedere, per questo gruppo di utilizzatori, sarà di 80 kW.

Il primo gruppo di motori (1 e 2 kW) assomma a 30 unità (20+10) per una potenza totale di 40 kW, il coefficiente di utilizzazione, rilevato dalla tabella, è 0,7, mentre quello di contemporaneità, essendo compreso fra 20 e 50 unità, può essere logicamente ottenuto dal valore medio dei due, ossia 0,45.

Il prodotto fra i due coefficienti (0,7 × 0,45) dà un coefficiente totale di 0,315 che potremo arrotondare a 0,32.

Moltiplicando la potenza nominale del gruppo per il coefficiente trovato, avremo (40 × 0,32) una potenza contemporanea presunta di 12,8 kW che potremo arrotondare a 13.

Il secondo gruppo di motori (3 e 5 kW) comprende 20 unità, per una potenza nominale complessiva di 90 kW.

Il coefficiente di utilizzazione è 0,8 e quello di contemporaneità 0,6, avremo quindi un coefficiente totale (0,8 × 0,6) di 0,48 che potremo arrotondare a 0,50. Eseguendo il prodotto (90 × 0,5) avremo che la potenza massima necessaria per alimentare questo gruppo è 45 kW.

Il terzo gruppo dei motori è costituito da quelli di 20 kW e, per brevità, comprendiamo in esso anche l'unico motore da 30 kW, avremo quindi un totale di 70 kW di potenza nominale. Il coefficiente totale, ricavato nel solito modo, può essere arrotondato a 0,65, quindi (70 × × 0,65) la potenza necessaria all'alimentazione del terzo gruppo sarà di 45,5 kW.

Il quarto gruppo comprende le saldatrici (10 × 5 kW); il coefficiente di utilizzazione è 1 e quello di contemporaneità è 0,4, quindi i 50 kW richiesti dal gruppo andranno moltiplicati per 0,4, e avremo da aggiungere alle potenze calcolare ancora 20 kW.

Riassumendo avremo:

1°	gruppo:	forni	80	kW
2°	»	motori da 1 e 2 kW	13	»
3°	»	» » 3 e 5 »	45	»
4°	»	» » 20 e 30 »	45,500	»
5°	»	saldatrici	20	»
		Totale	203,500	kW

A questo punto occorre tener conto del fattore di potenza medio mensile dell'impianto che un buon tecnico deve sempre presumere non minore di quello contrattuale (0,8), in quanto, se all'atto pratico il valore effettivo risultasse minore, egli dovrà intervenire mediante un impianto di rifasamento onde riportare il valore effettivo a quello contrattuale.

Dovremo quindi dividere il valore totale della potenza massima presunta per 0,8, onde ottenere il valore di potenza in kVA che ci dovrà servire per gli ulteriori sviluppi del progetto (potenza dei trasformatori, sezione dei conduttori).

Quindi:

$$203{,}5 : 0{,}8 = 254{,}370$$

che potremo arrotondare in 255 kVA

Il calcolo che abbiamo eseguito ci dice che da una potenza totale installata di 355 kW, la quale, considerando il fattore di potenza contrattuale, poteva essere ragguagliata a 443,750 kVA, siamo scesi, mediante le considerazioni fatte, ad un carico massimo presunto di 255 kVA con un coefficiente di riduzione medio totale di 0,57.

Per gli impianti d'illuminazione ed elettrodomestici il procedimento è identico, e stimiamo inutile ripetere l'esempio, essendo le tabelle desunte dalle Norme CEI di chiara interpretazione.

Criteri di scelta dei trasformatori in base al valore presunto della potenza contemporanea

Una volta giunti alla determinazione del valore presumibile della potenza contemporanea massima assorbibile dall'impianto, occorre scegliere la macchina o le macchine da installare nella cabina.

I criteri di scelta, a questo punto vertono su due fattori:

— valore della potenza nominale della macchina;
— convenienza della suddivisione di questo valore in più unità.

Prendendo come riferimento il valore calcolato nell'esempio della potenza contemporanea presunta, qualora ritenessimo di avere centrato in modo perfetto il dato in parola occorrerà aumentare il valore trovato di un 5 o 6 per cento, in quanto quello calcolato si riferisce alla potenza resa dalla macchina mentre, come abbiamo visto a pag. 14 secondo le Norme CEI 1953, la potenza nominale di un trasformatore si riferisce alla potenza assorbita.

Inoltre tenendo presente che il trasformatore fornisce il massimo rendimento intorno al 60% del carico (vedi tabella 35 a pag. 111) è necessario prevedere un ulteriore aumento nella potenza della macchina, in modo da ottenere il funzionamento medio su questo valore.

Oltre queste considerazioni sarà necessario tener presente che in genere occorrerà richiedere al trasformatore una ulteriore quota di potenza da destinare alla illuminazione che, nei mesi invernali tenderà a sovrapporsi al carico della forza motrice.

Nel caso suesposto, supponendo che l'impianto d'illuminazione assorba 15 kVA potremmo prevedere una macchina del tipo unificato da 315 kVA (potenza assorbita) con la quale potremo avere a disposizione 300 kVA effettivi.

Con questo si otterrebbe, nel caso più impegnativo, un carico di circa il 90% della potenza installata, nei mesi invernali, e quindi la macchina non esposta ad un lavoro eccessivo potrebbe considerarsi come usata razionalmente, d'altra parte il carico medio difficilmente supererebbe il 60% ottenendo con ciò le condizioni di massimo rendimento. Occorre però aggiungere altre osservazioni che riguardano le seguenti possibilità:

— eventuali aumenti della potenza installata;

— previsione di possibili diminuzioni anche temporanee d'assorbimento;

— eventuali guasti al trasformatore.

Eventuali aumenti della potenza installata.

Quando si decide la costruzione di uno stabilimento industriale è prevedibile che nei primi cinque anni d'esercizio si verifichino aumenti nel valore della potenza degli utilizzatori poichè, per quanto lo stabilimento sia ben proporzionato in partenza, è molto probabile che possa essere suscettibile di variazioni che ne aumentino la capacità produttiva, o che richiedano un maggiore assorbimento di potenza in dipendenza di variazioni apportate ai processi di produzione.

In genere l'eventualità esposta si verifica nel 90% dei casi, sarà quindi buona regola che il progettista preveda l'aumento di un buon 20% della potenza nominale massima presunta; ciò comporta una previsione di almeno 400 kVA installati.

Arrivati a questo punto, considerando il problema economico puro e semplice e facendo riferimento al solo onere di primo acquisto, sembrerebbe che la convenienza facesse propendere per l'acquisizione di una sola macchina avente una potenza nominale sufficiente a coprire il massimo assorbimento.

Previsioni di possibili diminuzioni, anche temporanee, di assorbimento.

È evidente che una stasi di mercato, concretantesi in una diminuzione delle richieste, mancati arrivi di materie prime, periodo annuale di ferie ecc., sono tutti motivi possibili perchè avvenga una diminuzione sentita nel valore di potenza dell'energia assorbita.

Questa eventualità pone la cabina di trasformazione in una fase critica, in quanto essendo costituita da una sola macchina, la potenza inserita in modo continuo non potrà subire diminuzioni, e mediante le perdite di trasformazione andrà ad aumentare gli oneri in un momento

niente affatto florido e nel quale possono essere gradite le più piccole economie.

Eventuali guasti al trasformatore.

Il trasformatore è una macchina solida, non ha parti in movimento, non è soggetta a logoramento meccanico, e quindi può essere considerata come una macchina di tutto riposo, fin quando non intervengano elementi imponderabili contro i quali non è possibile difendersi completamente; vogliamo con questo alludere ad eventuali guasti prodotti da sollecitazioni conseguenti onde di sovratensione a fronte ripido d'origine interna o atmosferica, a difetti di lavorazione non rivelatisi al collaudo e a tutta una massa di cause imprevedibili che possono determinare la necessità d'intervento, con il conseguente distacco della macchina dalla rete di alimentazione.

In questo caso, avere applicato il criterio economico che consiglia l'acquisto di una unica macchina di potenza adeguata, può essere la causa di un danno di entità direttamente proporzionale al valore della produzione, in quanto, venendo a mancare la fonte di energia, si impone un periodo più o meno lungo di completa fermata dello stabilimento.

Vorremmo che attraverso i ragionamenti che abbiamo sin qui esposto il tecnico si fosse convinto che nonostante il maggiore onere di primo acquisto, quando la potenza necessaria oltrepassi 150 kVA, la suddivisione in più macchine offre la possibilità di creare un impianto articolato e flessibile adatto comunque ad adeguarsi ad ogni situazione e permette il massimo e razionale sfruttamento dei trasformatori con il minimo danno qualunque sia l'evenienza considerata.

Infatti, mediante l'applicazione integrale del concetto esposto, si ottiene la possibilità di un adeguamento, sia pure grossolano, della potenza installata in relazione alle reali necessità del carico; è sempre possibile costituire una certa riserva di potenza nell'eventualità di guasto di una macchina, oltre a permettere interventi di manutenzione senza creare eccessivi fastidi alla produzione.

Partendo da questo presupposto, nella cabina di trasformazione sarà possibile, considerando i vari casi, prevedere due o più macchine comprese nei limiti delle potenze unificate, partendo come è ovvio, nel caso di minore impegno, da macchine di 100 kVA. Occorre però considerare che in ogni industria la potenza assorbita può essere, in prima appros-

simazione, scissa in due parti, ossia:

— potenza assorbita dai servizi generali;
— potenza assorbita dai processi di produzione.

In genere fra i servizi generali si comprendono tutti quegli utilizzatori che funzionano in continuità, indipendentemente dal processo produttivo, anche se ne costituiscono parte integrante, come le pompe per il sollevamento dell'acqua, l'eventuale carica in tampone di batterie d'accumulatori, il mantenimento di locali a temperatura controllata, le necessità energetiche delle case di abitazione di dipendenti a presenza continua, l'illuminazione notturna, ecc.

Tutti questi utilizzatori costituiscono un carico sempre presente, d'entità pressochè costante, per il quale, in genere, sarebbe da ritenersi opportuna la previsione d'installazione nella cabina di un'unità di potenza modesta che fosse in grado, non solo di sopperire al carico, ma di permettere inoltre l'alimentazione di macchine necessarie agli interventi di manutenzione sull'attrezzatura produttiva, da eseguire al di fuori dei normali cicli lavorativi, in modo da potere staccare e lasciare fuori tensione i trasformatori principali e, attraverso questo adeguamento della potenza in servizio alle reali necessità energetiche, realizzare un'economia sentita sulle perdite di trasformazione.

Naturalmente l'acquisto di questa macchina, delle apparecchiature di sezionamento e di protezione, suppongono l'impiego di un capitale, gl'interessi del quale, oltre alla relativa quota di ammortamento, devono essere aggiunti alle normali spese d'esercizio.

Se questo concetto non poteva essere messo in dubbio nel passato, visti i progressi tecnologici realizzati nella costruzione dei trasformatori, si rende necessario uno studio analitico comparativo del rendimento dalle varie macchine in funzione del carico, per poter stabilire i limiti di convenienza nell'adozione di una macchina di potenza ridotta.

Tale studio, condotto in modo rigoroso, potrà fornire ai tecnici progettisti una visione reale del valore della potenza assorbita dalle macchine unificate a parità di potenza resa, facilitando così il ragionamento economico che sta alla base di ogni progettazione.

Criteri di calcolo

Nelle tabelle e nei grafici che esporremo i calcoli sono stati basati sui dati unificati dall'ANIDEL per trasformatori con tensione nominale d'isolamento fino a 30 kV (tabella 28).

Limitando, per semplicità, lo studio ai trasformatori aventi una tensione nominale d'isolamento di 15 kV, sono state calcolate, in funzione della corrente e per ogni tipo di trasformatore compreso nell'unificazione, le perdite nel rame, riportate nella tabella 29.

Nella tabella 30 sono riportati, in funzione della percentuale del carico, i valori totali delle perdite per ogni trasformatore.

Per arrivare a stabilire l'effettiva potenza assorbita e quella resa in tutte le condizioni di carico dai vari trasformatori, onde poter effettuare un confronto efficiente, occorre calcolare per ogni potenza nominale, il valore della variazione di tensione in funzione della variazione di carico; nella tabella 31 sono riportati i dati relativi.

Nella tabella 32 sono invece riportati i valori delle tensioni, in percento di quella a vuoto, e per la tensione nominale di alimentazione, in funzione del carico a cos $\varphi = 0{,}8$ ritardo.

Dai dati riportati nelle tabelle precedenti, nelle tabelle 33-34-35, abbiamo riunito, per trasformatori aventi una tensione nominale d'isolamento di 15 kV, la potenza resa, la potenza assorbita e il rendimento in funzione del carico.

TABELLA N. 28 – **Valori unificati delle perdite nel rame, delle perdite nel ferro, della corrente a vuoto e della tensione di corto circuito, in funzione della potenza nominale, per trasformatori aventi tensione nominale di isolamento di 10-15-20-30- kV** (ANIDEL).

Potenza nominale (kVA)	classe 10 e 15 kV			classe 20 kV			classe 30 kV			Tension. di corto circuito (%)
	Perdite rame a 75 °C (W)	Perdite ferro (W)	Corrente a vuoto (%)	Perdite rame a 75 °C (W)	Perdite ferro (W)	Corrente a vuoto (%)	Perdite rame a 75 °C (W)	Perdite ferro (W)	Corrente a vuoto (%)	
25	510	102	2,8	570	115	3,5	—	—	—	
40	725	145	2,6	810	162	3,3	880	180	4,0	
63	1 020	206	2,4	1 130	230	3,1	1 230	250	3,8	
100	1 450	296	2,3	1 600	326	2,9	1 740	354	3,6	
125	1 720	352	2,2	1 900	388	2,7	2 060	418	3,4	4,2
160	2 080	426	2,1	2 300	468	2,5	2 480	505	3,2	
200	2 470	505	2,0	2 730	555	2,4	2 940	600	3,0	
250	2 920	600	1,9	3 230	660	2,3	3 480	710	2,8	
315	3 470	720	1,8	3 840	790	2,2	4 140	850	2,6	
400	4 160	865	1,75	4 600	945	2,1	4 950	1 020	2,5	
500	4 920	1 030	1,7	5 440	1 120	2,0	5 850	1 210	2,4	

TABELLA N. 29 – **Valori delle perdite nel rame, espressi in watt, in funzione della percentuale di carico per trasformatori di diverse potenze nominali.**

Percentuali di carico	Potenza nominale del trasformatore (kVA)							
	25	**63**	**100**	**160**	**200**	**315**	**400**	**500**
100	510	1 020	1 450	2 080	2 470	3 470	4 160	4 920
75	287	573	815	1 170	1 390	1 950	2 330	2 770
50	128	255,5	363	520	618	868	1 040	1 230
25	31,8	63,8	90,8	130	154	217	260	307
20	20,3	40,8	58	83,2	98,5	138,5	166	197
15	11,5	23,0	32,5	46,8	55,5	78	93,5	110,5
10	5,1	10,2	14,5	20,8	24,7	34,7	41,6	49,2
5	1,28	2,55	3,62	5,2	6,18	8,7	10,4	12,3
1								

TABELLA N. 30 – **Valore delle perdite totali (rame + ferro), espressi in watt, in funzione della percentuale del carico, per trasformatori di diverse potenze nominali.**

Percentuali di carico	Potenza nominale del trasformatore (kVA)							
	25	**63**	**100**	**160**	**200**	**315**	**400**	**500**
100	612	1 226	1 740	2 506	2 975	4 190	5 025	5 950
75	389	779	1 111	1 596	1 895	2 670	3 185	3 800
50	230	461,5	659	946	1 123	1 588	1 905	2 260
25	133,8	269,8	386,8	556	659	937	1 125	1 337
20	122,7	246,8	354	509,2	603,5	858,5	1 031	1 227
15	113,5	229,0	328,5	472,8	560,5	798	958,5	1 140,5
10	107,1	216,2	310,5	446,8	529,7	754,7	906,6	1 079
5	103,3	208,5	299,6	431,2	511,2	728,7	875,4	1 042
1	102	206,0	296	426	505	720	865	1 030

TABELLA N. 31 – **Variazione percentuale della tensione secondaria in funzione del carico a cos φ = 0,8 ritardo, per trasformatori di diverse potenze nominali.**

Percentuali di carico	Potenza nominale del trasformatore (kVA)							
	25	**63**	**100**	**160**	**200**	**315**	**400**	**500**
100	3,85	3,64	3,55	3,46	3,43	3,34	3,31	3,27
75	2,88	2,72	2,66	2,60	2,57	2,50	2,49	2,45
50	1,92	1,81	1,77	1,72	1,71	1,66	1,64	1,62
25	0,96	0,90	0,88	0,86	0,85	0,83	0,82	0,81
20	0,765	0,72	0,70	0,67	0,68	0,66	0,65	0,64
15	0,575	0,54	0,53	0,515	0,51	0,50	0,49	0,48
10	0,385	0,36	0,35	0,345	0,34	0,33	0,33	0,33
5	0,19	0,18	0,175	0,17	0,17	0,165	0,165	0,16
1	0,04	0,04	0,04	0,035	0,035	0,035	0,035	0,03

TABELLA N. 32 – **Tensioni secondarie, in percento di quella a vuoto, in funzione della percentuale di carico a cos φ = 0,8 ritardo, per trasformatori di diverse potenze nominali.**

Percentuali di carico	Potenza nominale del trasformatore (kVA)							
	25	**63**	**100**	**160**	**200**	**315**	**400**	**500**
100	96,15	96,36	96,45	96,54	96,57	96,66	96,69	96,73
75	97,12	97,28	97,34	97,40	97,43	97,50	97,51	97,55
50	98,08	98,19	98,23	98,28	98,29	98,34	98,36	98,38
25	99,04	99,10	99,12	99,14	99,15	99,17	99,18	99,19
20	99,23	99,28	99,30	99,31	99,32	99,34	99,34	99,35
15	99,43	99,46	99,47	99,48	99,49	99,50	99,51	99,52
10	99,62	99,64	99,65	99,66	99,66	99,67	99,67	99,68
5	99,81	99,82	99,83	99,83	99,83	99,83	99,84	99,84
1	99,96	99,96	99,96	99,97	99,97	99,97	99,97	99,97

TABELLA N. 33 – **Valori della potenza resa, espressi in chilowatt, in funzione del carico a cos φ = 0,8 ritardo.**

Percentuali di carico	Potenza nominale del trasformatore (kVA)							
	25	**63**	**100**	**160**	**200**	**315**	**400**	**500**
100	19 230	48 500	77 150	123 000	154 000	243 500	310 000	386 500
75	14 570	36 850	58 300	93 500	117 000	185 000	234 000	293 000
50	9 810	24 730	39 250	62 900	78 600	124 000	157 600	196 500
25	4 955	12 500	19 800	31 750	39 650	62 400	79 400	99 200
20	3 965	10 000	15 880	25 450	31 800	50 200	63 600	79 500
15	2 990	7 520	11 920	19 100	23 900	37 600	47 800	59 800
10	1 992	5 020	7 970	12 770	15 930	25 150	31 950	39 800
5	998	2 515	3 995	6 390	7 980	12 580	15 970	19 960
1	200	504	800	1 280	1 600	2 520	3 200	4 000

TABELLA N. 34 – **Valori della potenza assorbita, espressi in chilowatt, in funzione del carico a cos φ = 0,8 ritardo.**

Percentuali di carico	Potenza nominale del trasformatore (kVA)							
	25	**63**	**100**	**160**	**200**	**315**	**400**	**500**
100	19 842	49 726	78 896	125 506	157 475	247 690	315 025	392 350
75	14 959	37 629	59 411	95 096	118 895	187 670	237 195	296 800
50	10 040	25 191	39 909	63 846	79 723	125 588	159 505	198 760
25	5 089	12 770	20 187	32 306	40 309	63 337	80 525	100 537
20	4 088	10 247	16 234	25 959	32 403	51 058	64 631	80 727
15	3 104	7 749	12 249	19 573	24 460	38 398	48 759	60 940
10	2 099	5 236	8 280	13 217	16 460	25 905	32 857	40 879
5	1 101	2 723	4 295	6 821	8 491	13 309	16 827	21 002
1	302	710	1 096	1 706	2 105	3 240	4 065	5 030

Le tabelle 33-34, per comodità del lettore, sono state riportate in diagramma per rendere accessibili, senza ulteriori calcoli, tutti i valori in corrispondenza di tutte le percentuali di carico (figg. 44-45-46-47).

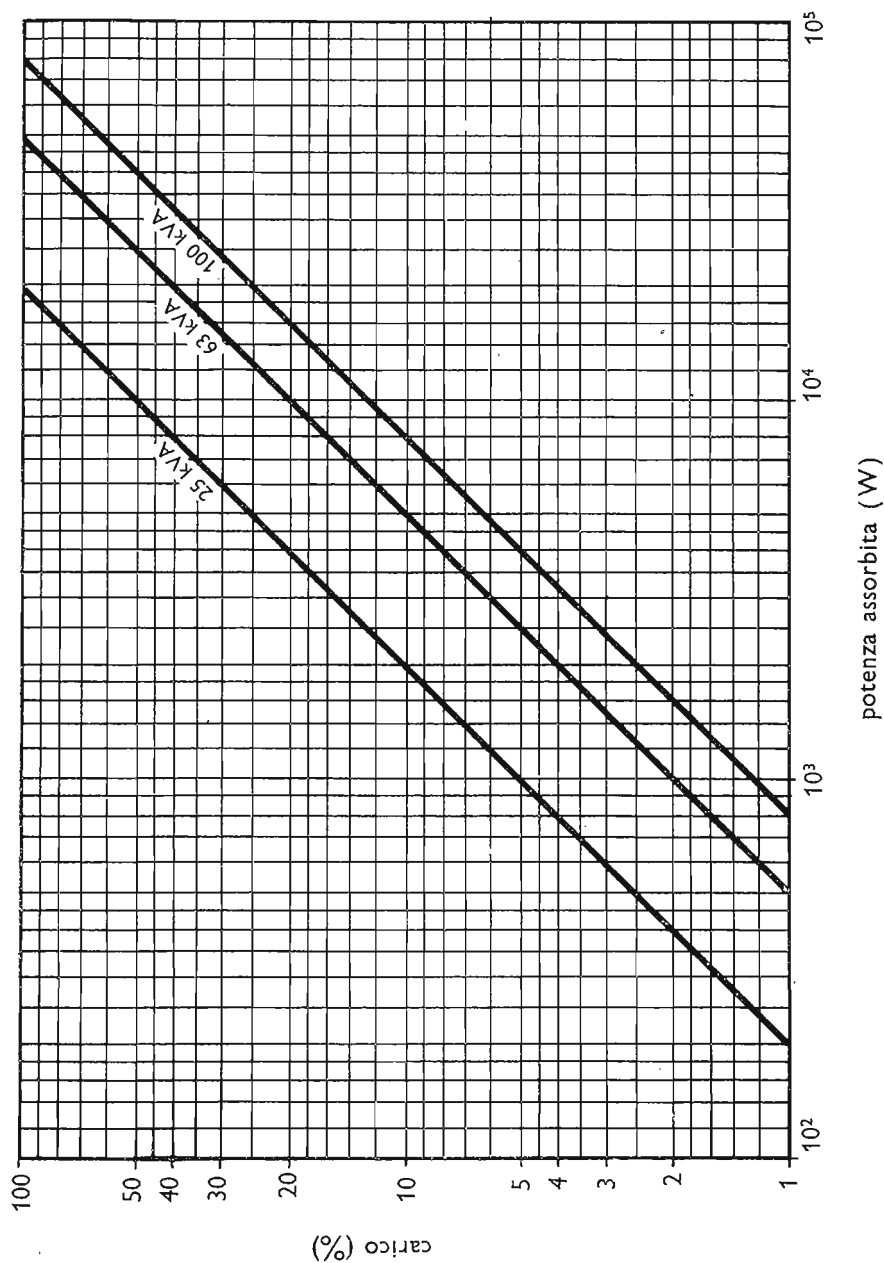



Fig. 44 - Grafico per la determinazione della potenza assorbita, in funzione del carico, per trasformatori trifase a due avvolgimenti aventi una potenza nominale di 25-63-100 kVA.

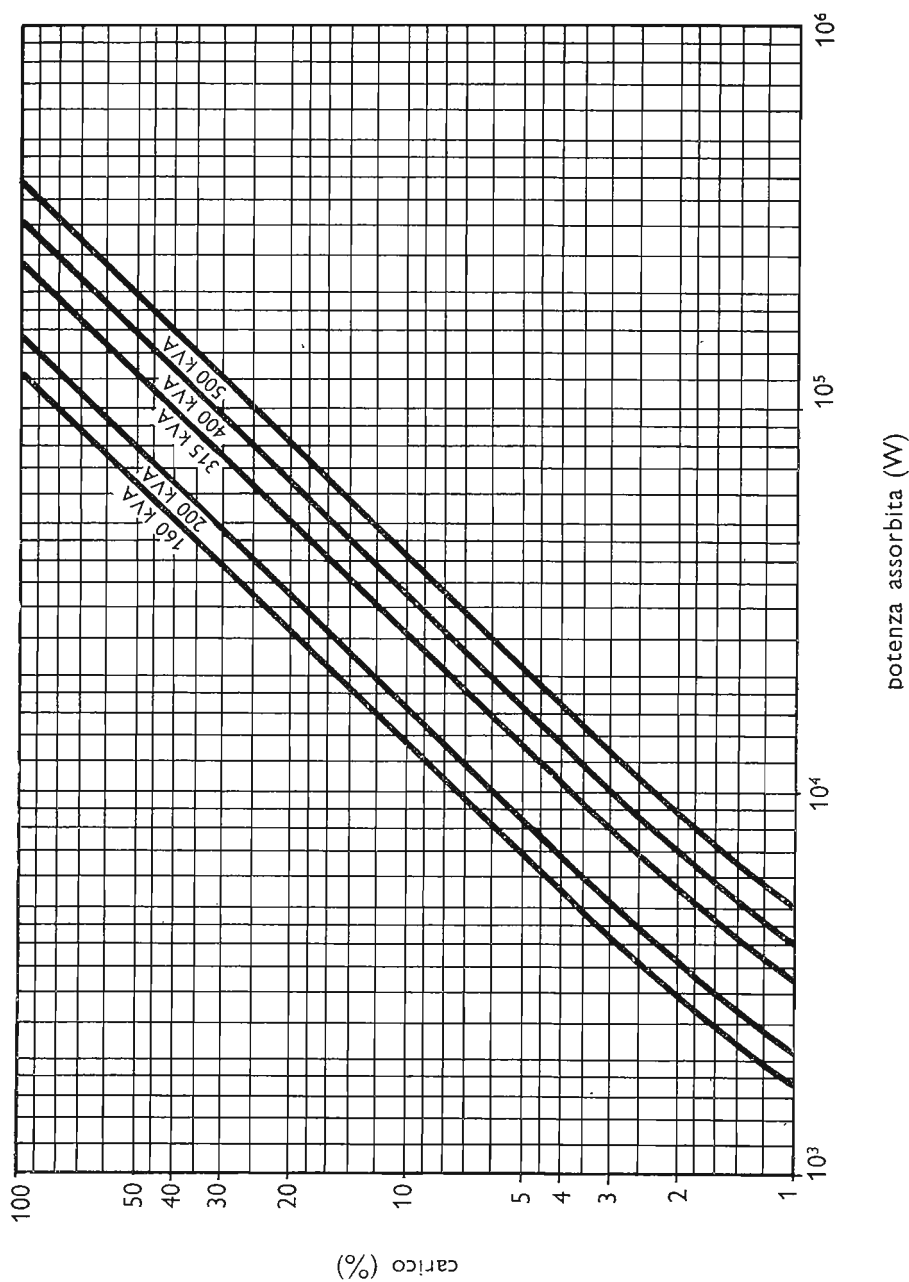



Fig. 45 – Grafico per la determinazione della potenza assorbita, in funzione del carico, per trasformatori trifase a due avvolgimenti aventi una potenza nominale di 160-200-315-400-500 kVA.

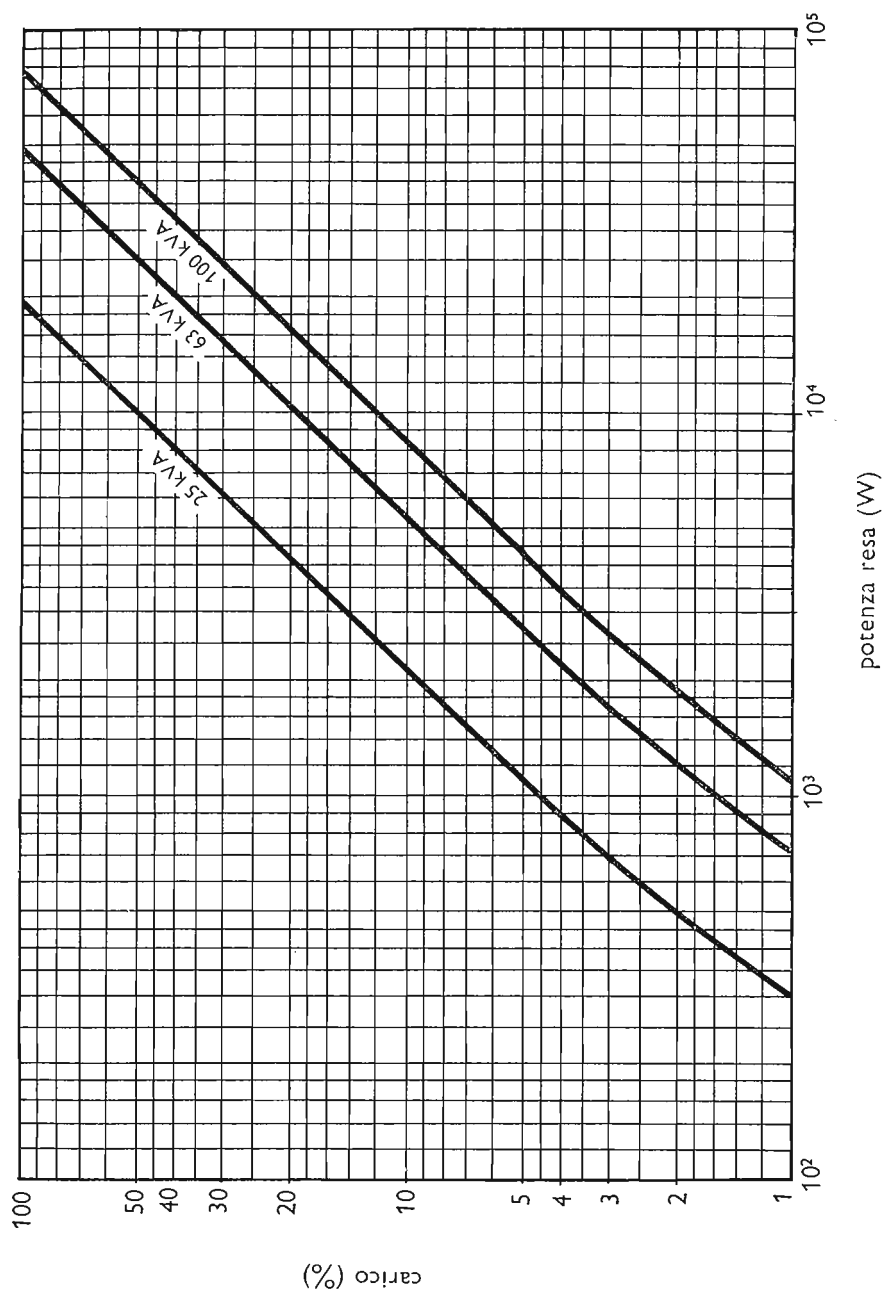



Fig. 46 – Grafico per la determinazione della potenza resa in funzione del carico, per trasformatori trifase a due avvolgimenti, della potenza nominale di 25-63-100 kVA.

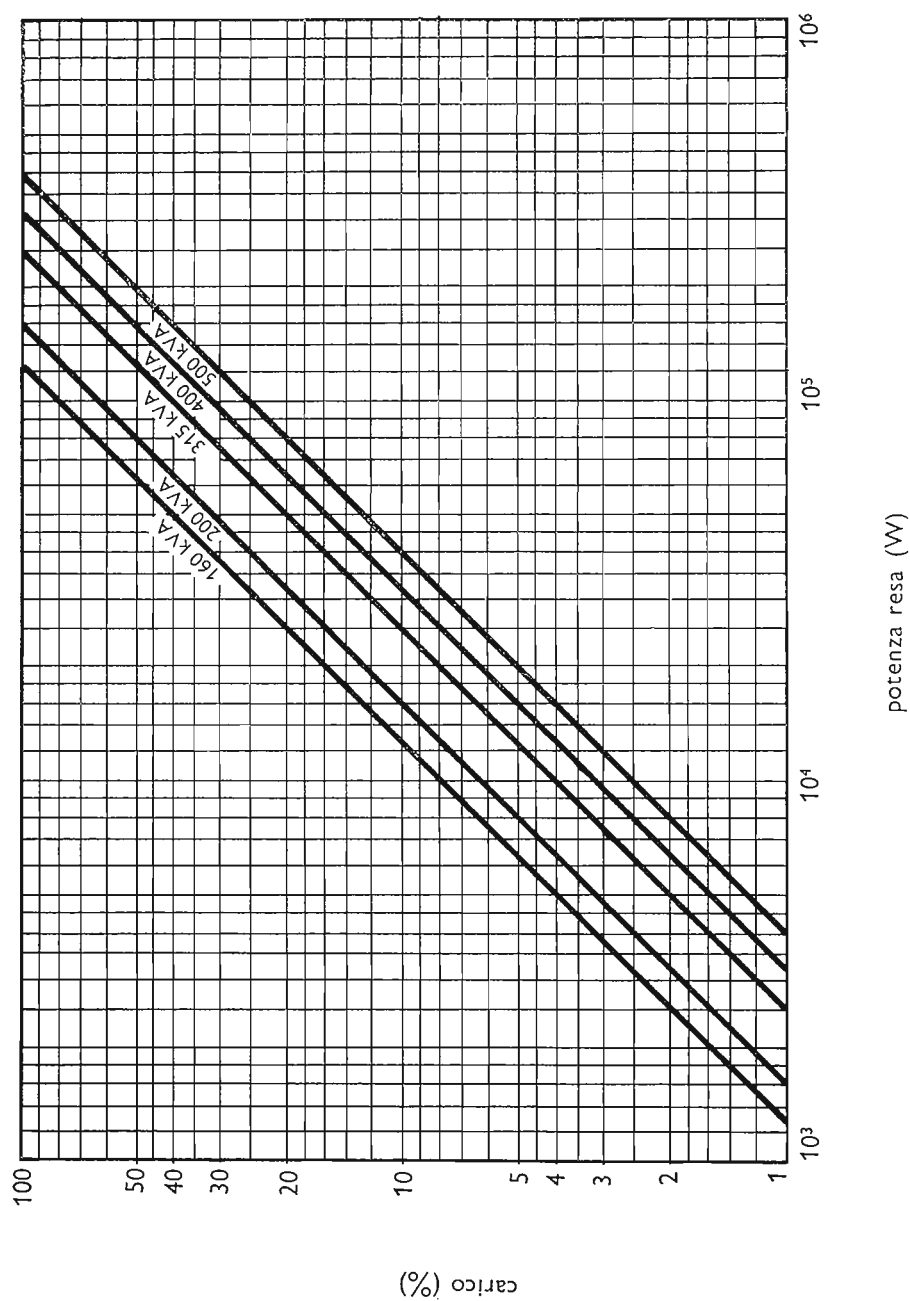



Fig. 47 – Grafico per la determinazione della potenza resa in funzione del carico, per trasformatori trifase a due avvolgimenti, della potenza nominale di 160-200-315-400-500 kVA.

TABELLA N 35. – **Rendimento percentuale in funzione del carico a cos φ = 0,8 ritardo.**

Percentuali di carico	Potenza nominale del trasformatore (kVA)							
	25	**63**	**100**	**160**	**200**	**315**	**400**	**500**
100	96,92	97,54	97,79	98,00	98,11	98,31	98,40	98,48
75	97,40	97,93	98,13	98,32	98,40	98,58	98,65	98,72
50	97,70	98,17	98,35	98,52	98,59	98,74	98,81	98,86
25	97,38	97,89	98,08	98,28	98,37	98,52	98,60	98,67
20	97,00	97,59	97,82	98,03	98,14	98,32	98,40	98,48
15	96,34	97,05	97,32	97,58	97,71	97,92	98,04	98,13
10	94,90	95,87	96,25	96,62	96,78	97,09	97,24	97,36
5	90,62	92,35	93,03	93,67	93,98	94,53	94,80	95,04
1	66,25	70,95	72,95	76,00	77,75	78,70	78,70	79,55

Ogni tabella è stata suddivisa in due diagrammi in modo che, adottando scale diverse, i valori da ricercare risultino chiaramente espressi.

Tutto il lavoro svolto fino a questo momento offre la possibilità di confrontare in modo diretto la potenza assorbita a parità di valore del carico dai trasformatori di tipo unificato, in funzione della potenza nominale e di poter giungere quindi a ragion veduta, alle considerazioni di carattere economico che stanno alla base della progettazione.

In genere, il carico assorbito dai servizi generali ha un valore che varia in modo molto modesto al variare del valore della potenza contemporanea presunta, in quanto i servizi si mantengono pressappoco uguali nella quasi totalità dei casi.

In ogni modo, onde poter esporre dati di confronto usabili in ogni caso, supponiamo di scindere gli stabilimenti industriali in due categorie, delle quali la prima supponga un assorbimento di potenza per i servizi generali di 15 kW e la seconda di 30 kW, con un valore del fattore di potenza uguale a 0,8 in ritardo.

In base alla tabella dei rendimenti in funzione del carico potremo avere i dati di confronto riportati nelle tabelle 36 e 37.

Le due tabelle offrono interessanti rilievi rispetto alla potenza assorbita, ma non sono sufficienti a stabilire un vero criterio di convenienza economica.

TABELLA N. 36 – **Valori della potenza assorbita per trasformatori di diverse potenze nominali, nel caso di assorbimento per i servizi generali di 15 kW a cos φ = 0,8 ritardo.**

Potenza nominale del trasformatore (kVA)	Potenza assorbita, per la potenza resa di 15 kW a cos φ = 0,8 ritardo (W)	Differenza di potenza assorbita rispetto al trasformatore da 25 kVA (W)
25	15 400	—
100	15 413	13
160	15 552	152
200	15 726	326
315	16 037	637
400	16 718	1 318
500	17 200	1 800

TABELLA N. 37 – **Valori della potenza assorbita per trasformatori di diverse potenze nominali, nel caso di assorbimento, per i servizi generali di 30 kW a cos φ = 0 ritardo.**

Potenza nominale del trasformatore (kVA)	Potenza assorbita, per la potenza resa di 30 kW a cos φ = 0,8 ritardo (W)	Differenza di potenza assorbita rispetto al trasformatore da 63 kVA (W)
63	30 456	—
100	30 559	103
160	30 613	157
200	30 946	490
315	30 972	516
400	31 383	827
500	31 410	954

Criteri economici

Infatti, in qualsiasi campo produttivo, le decisioni circa l'installazione o meno di una macchina devono sottostare ad un esame economico complesso che comprende, oltre al rendimento annuo ricavabile, anche le considerazioni riguardanti il capitale necessario per l'acquisto della macchina e delle apparecchiature ausiliarie, l'interesse passivo del capitale immobilizzato, la quota di ammortamento, le spese di manutenzione e d'esercizio.

È evidente che sarà conveniente l'acquisto della macchina quando il rendimento annuo moltiplicato per la durata media presunta della macchina stessa, comporterà una cifra nettamente superiore a quella necessaria a coprire tutte le voci in uscita esposte.

Il confronto con una macchina operatrice calza anche nel caso dei trasformatori da installare nelle cabine di trasformazione, in quanto di essi si può stabilire la durata media, generalmente calcolabile in venti anni, le spese di manutenzione, il costo della macchina e delle apparecchiature ausiliarie, nonchè il rendimento inteso come diminuzione delle perdite di trasformazione e risultante, per i due casi considerati, dai dati raccolti sotto la voce « differenze » nelle tabelle 36 e 37.

Il criterio di convenienza può essere stabilito in modo più reale di quello che è possibile ottenere per una macchina operatrice, in quanto il trasformatore può essere, con buona approssimazione, considerato come una macchina non soggetta al fenomeno dell'obsolescenza, che tende a rendere estremamente aleatorie le previsioni eseguite sulle macchine utensili e operatrici.

Riferendo i dati da prendere in considerazione alle quotazioni del 1963 relative alle macchine e ai materiali avremo, per i due casi considerati, qualora si dovesse acquistare un trasformatore unificato da 25 kVA, o un trasformatore da 63 kVA, le spese riportate nello specchietto a pagina seguente.

L'ammortamento del capitale, relativo agli oneri di acquisizione della macchina e delle apparecchiature ausiliarie, deve essere computato, a norma della circolare n. 350620 del 1-3-57 emanata dall'Intendenza di Finanza, da un minimo dell'8% a un massimo del 15%; quindi, tenendo conto della vita media del trasformatore e allo scopo di contenere l'onere dovuto all'interesse, sceglieremo un periodo d'ammortamento di 7 anni, per il quale dovremo calcolare l'interesse scalare del 7% riferito alla durata dell'ammortamento.

	Trasformatore da 25 kVA	Trasformatore da 63 kVA
– Spese di primo acquisto lire	310 000	445 000
– Apparecchiature ausiliarie: sezionatori sottocarico; valvole fusibili a M.T.; interruttore automatico di massima corrente a B.T.; collegamenti e posa in opera lire	220 000	220 000
– Onere per maggiorazione di spazio occupato (8 m²) a lire 10 000 annue per 20 anni lire	200 000	200 000
– Manutenzione: trattamenti dell'olio ed eventuali guasti lire	150 000	150 000
Totale lire	**880 000**	**1 015 000**

Perciò su un capitale, rispettivamente di 530 000 lire e di 665 000 lire, dovremo aggiungere gli oneri calcolati che sono, per il primo, 148 400 lire, e per il secondo, 196 100 lire in modo che l'onere globale diverrà:

L. 1 028 400 per il trasformatore da 25 kVA
L. 1 211 100 per il trasformatore da 63 kVA

Dalle cifre esposte deve essere detratto il residuo utile, in quanto, al termine dei 20 anni, anche calcolando la macchina a prezzo di rottame e le apparecchiature al 40%, si potranno ricavare circa 100 000 lire dal trasformatore da 25 kVA, e 120 000 dal trasformatore da 63 kVA; in definitiva avremo un onere globale:

per il trasformatore da 25 kVA L. 928 400
per il trasformatore da 63 kVA L. 1 061 100

Non installando i trasformatori suddetti, e calcolando mediamente il costo del chilovattora a L. 12, potrà rilevarsi una spesa maggiorata per l'energia, riferita al periodo di vent'anni, preso come base della vita di un trasformatore, funzione diretta, a parità di altre condizioni, del

valore della potenza nominale del trasformatore che rimarrà in servizio per effettuare l'erogazione del carico assorbito dai servizi generali.

TABELLA N. 38 – **Maggiorazioni di spesa nel caso di 15 kW cos φ = 0,8 ritardo di carico.**

Potenza nominale del trasformatore (kVA)	Differenze (W)	Maggiorazione annua (lire)	Maggiorazione totale (lire)
100	13	288	4 562
160	152	11 555	231 137
200	326	24 786	495 720
315	637	48 432	968 640
400	1 318	100 210	2 004 200
500	1 800	136 857	2 737 140

TABELLA N. 39 – **Maggiorazioni di spesa nel caso di 30 kW, cos φ = 0,8 ritardo di carico.**

Potenza nominale del trasformatore (kVA)	Differenze (W)	Maggiorazione annua (lire)	Maggiorazione totale (lire)
100	103	7 831	156 620
160	157	11 936	228 720
200	490	37 255	745 100
315	516	39 232	784 640
400	827	62 878	1 257 560
500	954	72 534	1 450 680

L'utilizzazione a carico ridotto, tenendo conto della settimana di 48 ore lavorative, avrà una durata di 120 ore per 50 settimane, più 336 ore comprese nelle due settimane annuali di ferie, con un totale di 6 336 ore.

Non si è ritenuto di dover tenere conto delle festività infrasettimanali perchè una certa percentuale può cadere in domenica.

Moltiplicando la cifra ottenuta per le differenze in più, notate nell'ultima colonna delle tabelle 38 e 39, e per il costo di un chilovattora, potremo ricavare la spesa annua che, successivamente moltiplicata per 20 fornirà la maggiorazione totale della spesa, relativa alle perdite d'energia dovute al minor rendimento, in corrispondenza di carichi modesti, dei trasformatori unificati compresi fra 100 e 500 kVA di potenza nominale.

Conclusioni

Dalle tabelle esposte risulta chiaramente che la convenienza dell'istallazione di un trasformatore di potenza modesta, atto ad erogare il carico assorbito dai servizi generali, si riscontra solo quando nella cabina siano installate unità di trasformazione della potenza nominale di 400 kVA, per un carico di 30 kW, e da 315 per un carico di 15 kW.

Il risultato è logico qualunque sia il punto di vista che si considera.

Dalle tabelle è possibile rilevare anche che, quando nella cabina sono installate due unità da 100 o da 160 kVA, è dubbia la convenienza di staccare, alla fine del ciclo lavorativo, una delle due macchine.

Queste conclusioni sono riferite ai trasformatori con tensioni nominali d'isolamento di 10 e 15 kV, ma possono essere estese anche alle classi 20 e 30 kV come si può facilmente verificare procedendo ad alcuni semplici calcoli di verifica.

CAPITOLO II

CRITERI DI SCELTA DEL VALORE DELLA TENSIONE DEI COLLEGAMENTI INTERNI E DELLA TENSIONE DA PORTARE AGLI UTILIZZATORI

Il valore della tensione, destinata all'alimentazione dell'impianto, difficilmente è determinabile dal tecnico progettista, in quanto dipende dall'ubicazione della cabina rispetto alla rete di distribuzione preesistente e alle possibilità dell'Azienda distributrice.

Il valore della tensione primaria non crea problemi che possono prestarsi a diverse soluzioni, in quanto occorre risolverli dimensionando le macchine e le apparecchiature che dovranno essere previste adatte alla tensione d'isolamento relativa al valore della tensione d'esercizio.

Nel caso molto improbabile che esista la possibilità di scelta fra due valori di tensione, è consigliabile optare per quella avente un valore minore, in quanto, stante la limitazione della potenza richiesta, che difficilmente assume limiti eccessivamente onerosi, non necessita prevedere conduttori di sezione maggiorata rispetto quelli d'uso normale le cui dimensioni minime sono determinate più da criteri meccanici che elettrici.

Altrettanto si può dire per le apparecchiature di normale costruzione, i cui limiti minimi di portata sono più che sufficienti, con ampi margini, qualunque sia il valore della tensione compreso fra quelle generalmente in uso, tenendo presente che l'onere d'acquisto diminuisce in maniera sentita, con la diminuzione del valore della tensione d'esercizio e quindi della classe d'isolamento.

D'altra parte in questa considerazione deve avere il suo peso anche il dimensionamento del locale da adibire a cabina di trasformazione, la cui capienza incide notevolmente sulla spesa globale d'impianto, sia come opere murarie, sia come occupazione permanente di un'area che deve essere sottratta a quella disponibile.

Come ripetiamo però queste considerazioni dovranno essere difficilmente dibattute, poichè l'Azienda distributrice dell'energia indicherà, senza possibilità di discussione, il valore della tensione d'esercizio.

Possibilità di variazioni nel valore della tensione di alimentazione

In genere il valore della tensione indicata dal distributore dell'energia costituisce il valore medio fra quelli che effettivamente verranno forniti in esercizio.

Onde ovviare agli inconvenienti che potrebbero conseguire valori di tensione al di sopra o al di sotto della media, nel trasformatore deve essere previsto un commutatore, che offra la possibilità, entro certi limiti, di variare il numero delle spire che costituiscono l'avvolgimento a media tensione.

Questo apparecchio, nei trasformatori di potenza modesta, deve essere manovrato a macchina disinserita, poichè nel passaggio da una presa all'altra avviene l'interruzione metallica dell'avvolgimento.

Per trasformatori di potenza notevole, o nei casi in cui si ritiene necessario che la tensione secondaria abbia un valore costante, indipendente delle variazioni che potessero avvenire sull'alimentazione, la macchina deve essere munita di variatore di tensione agente sottocarico, che può essere manovrato a mano o comandato automaticamente da relè sensibili alle variazioni della tensione di alimentazione.

Questi apparecchi sono costruiti in modo da non provocare interruzioni durante lo spostamento del commutatore.

Nella fig. 48 è possibile vedere sia la parte di un commutatore manovrabile sottocarico che viene immersa nell'olio all'interno della cassa di contenimento della macchina, sia la parte esterna nella quale è ben distinguibile la manetta per la manovra a mano.

Per trasformatori di potenza media, non oltre i 1000 kVA, nella fig. 49 è riportata la forma esterna di un commutatore manovrabile sottocarico costruito dalla CEM, mentre nella fig. 50 abbiamo ripreso lo schema funzionale relativo.

Nei confronti del dimensionamento dei trasformatori avremo quindi stabilito tre dati essenziali, ossia, il numero delle macchine, la loro potenza, la tensione primaria e le sue possibili variazioni, rimane ora da determinare la scelta dei collegamenti interni e il valore della tensione secondaria che deve essere portata agli utilizzatori.

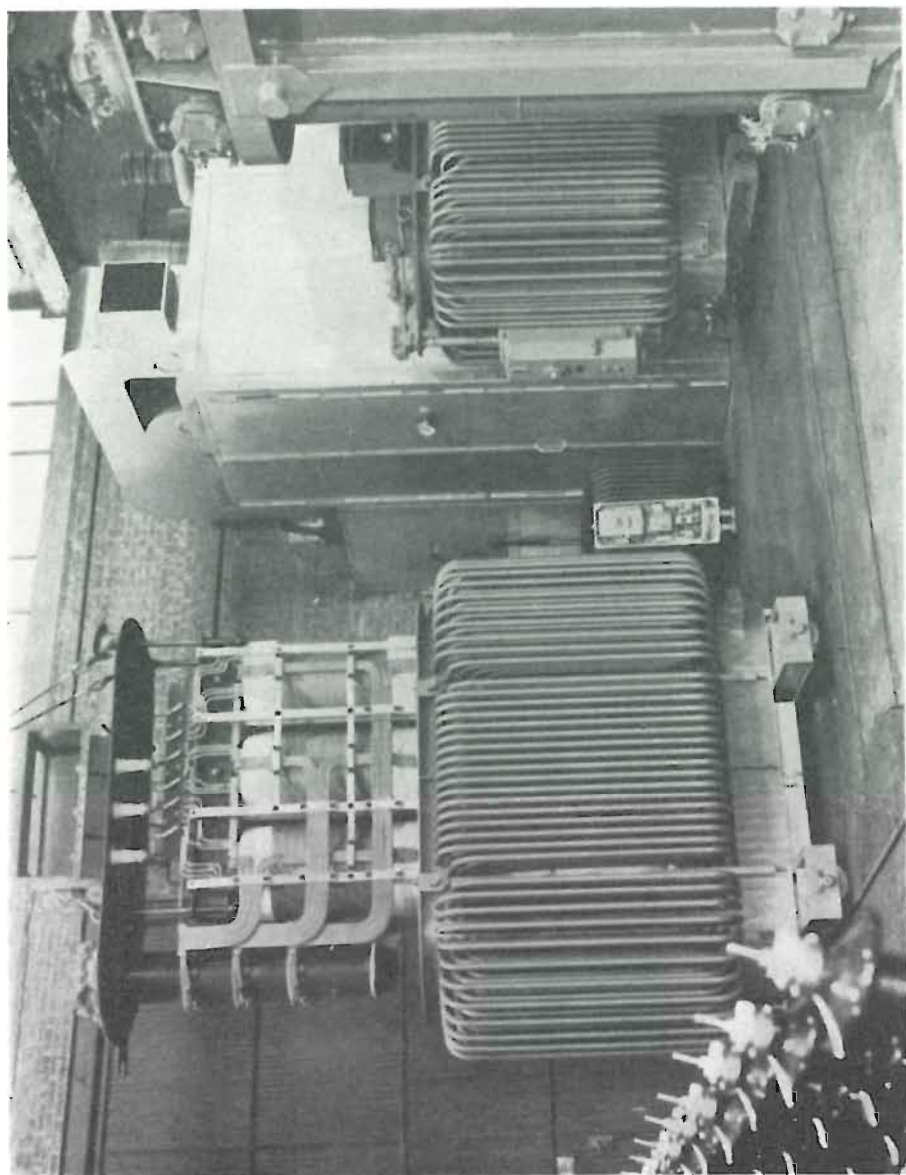



Fig. 48 – Commutatore manovrabile sottocarico Speziaelettric montato su trasformatore Trafo; a destra è visibile la parte esterna con il comando manovrabile a mano.

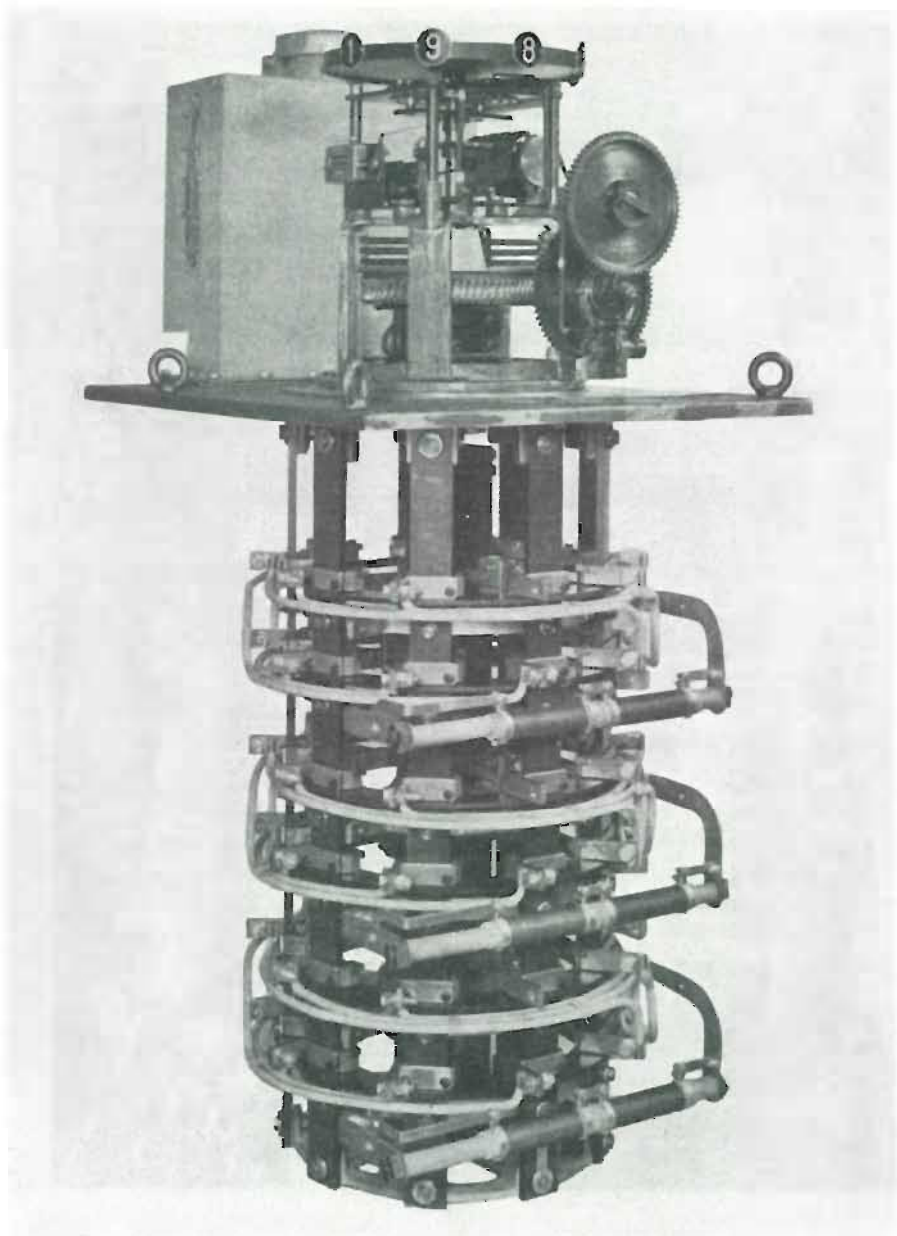



Fig. 49 *a* – Commutatore manovrabile sottocarico CEM a 9 posizioni tipo M 15 - 24 kV - 1200 A.

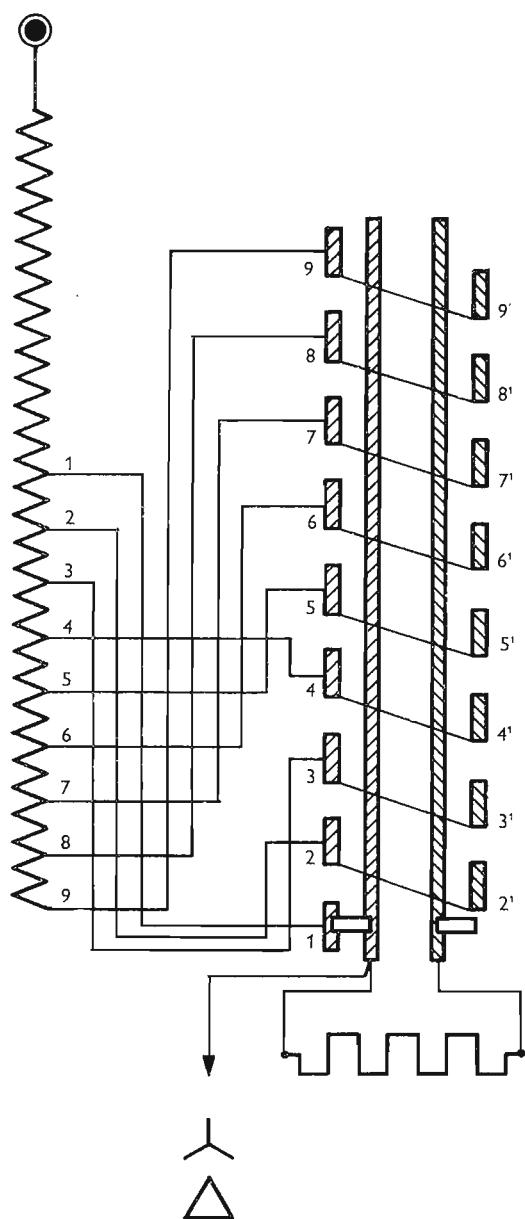



Fig. 49 *b* – Disposizione schematica del commutatore CEM.

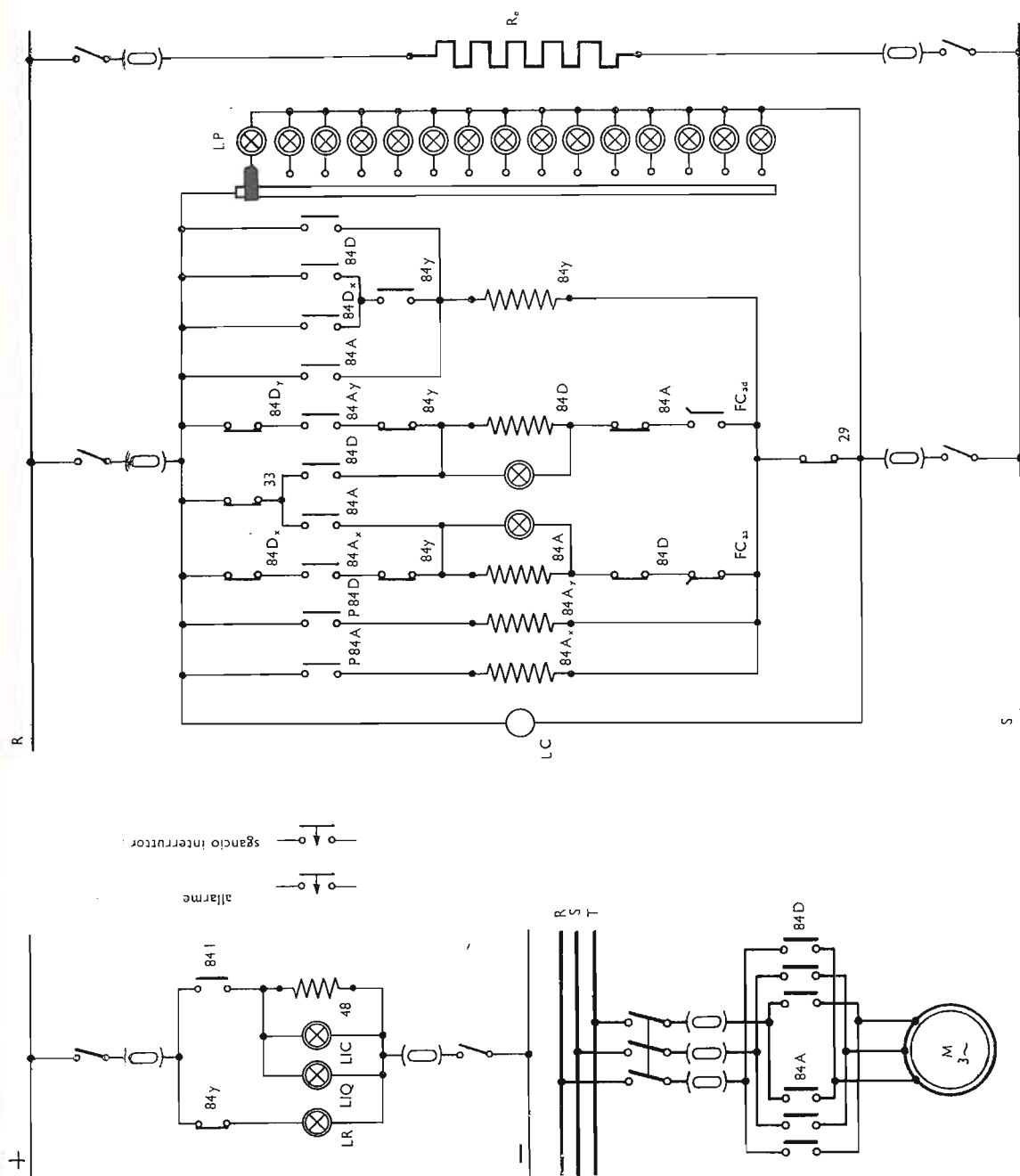



Fig. 50 - Schema funzionale di comando e di controllo del commutatore illustrato nella fig. 49.

Criteri di scelta dei collegamenti interni

I collegamenti interni dei trasformatori, per i quali abbiamo riportato a pag. 12 gli schemi relativi per i gruppi indicati dalle Norme CEI, caratterizzano la macchina e devono essere scelti in relazione al sistema elettrico che si ritiene più conveniente per l'impianto utilizzatore.

Infatti, qualora si intenda usufruire per l'impianto d'illuminazione della tensione stellata, distribuendo equamente il carico fra i conduttori di fase, è evidente che l'avvolgimento secondario deve essere collegato a stella.

In questo caso l'avvolgimento primario e consigliabile venga scelto con collegamento a triangolo, poichè con questo si tende a riequilibrare eventuali squilibri di carico dovuti ad apparecchi monofase che possono esistere nell'impianto.

Scegliendo un collegamento stella/stella, una differenza di carico fra i conduttori di fase darebbe luogo ad una dissimmetria sentita nei valori di tensione, tale da sconsigliare questa scelta, riservandola solo al caso di alimentazione diretta di una macchina utilizzatrice trifase, per la quale sia da escludere in via assoluta qualsiasi assorbimento squilibrato.

Le Norme CEI 14-1-1953, fasc. 78, raccomandano di scegliere, fra i gruppi esposti nella tabella, quelli distinti dalle cifre 0 e 11.

È evidente che quando non sussista alcuna ragione contingente per scegliere il collegamento a stella dell'avvolgimento secondario, il collegamento più consigliabile, ai fini della stabilità dei valori di tensione fra conduttori di fase, è quello triangolo/triangolo.

La scelta dei collegamenti interni dei trasformatori, e in special modo del gruppo di appartenenza, deve rispondere anche ad un criterio economico, poichè trasformatori aventi collegamenti normalmente usati dalla maggioranza, in caso di alienazione, potranno trovare un collocamento più facile, e offrire quindi una possibilità economica di recupero più remunerativa.

Criteri di scelta del valore della tensione per l'alimentazione degli utilizzatori

Il valore della tensione necessaria per il funzionamento degli utilizzatori previsti nell'impianto può essere determinata, senza possibilità di scelta, dal valore di tensione nominale degli utilizzatori stessi, in quanto facenti parte o provenienti da un impianto preesistente; natu-

ralmente in questo caso il progettista non potrà che prevedere il valore necessario, tenendo presente che, come abbiamo già esposto nella prima parte, la tensione nominale secondaria, per trasformatori a due avvolgimenti, si intende a vuoto, e che quindi occorre indicare nella richiesta un valore maggiorato, rispetto a quello necessario per il funzionamento degli utilizzatori, della caduta di tensione da vuoto a carico.

Detta maggiorazione rispecchia in genere, in valore percentuale, quello espresso nella targa dalla tensione percentuale di corto circuito, salvo arrotondamenti di poco conto consigliati dalla pratica, per esempio, nel caso si volesse ottenere a carico la tensione di 220 V in un trasformatore avente una tensione percentuale di corto circuito dal 4,2%, sarebbe necessario chiedere una tensione a vuoto di 229,4 V; per semplicità si indica 230 V.

Quando l'impianto utilizzatore non esiste occorre naturalmente scegliere il valore della tensione d'esercizio, al quale dovranno essere adeguati tutti gli utilizzatori.

In genere è opportuno limitare la scelta alle tensioni normalizzate, poichè il mercato, nel riguardo dei motori, tende a standardizzare la produzione sui valori generalmente usati, per cui potremo optare per 220 o per 380 V.

Scegliere una tensione diversa significherebbe creare innumerevoli difficoltà per l'acquisto dei motori, che inoltre costituirebbe, senza dubbio, un onere fortemente maggiorato, non potendo usufruire dalle notevoli riduzioni di costo conseguenti la produzione in serie.

Ridotto il campo di scelta a questi due valori subentra una questione economica preponderante, dovuta a tre fattori che il progettista non deve trascurare:

— sezione dei conduttori;
— perdite d'energia per il trasporto della corrente;
— costo degli impianti di protezione degli operatori dalle tensioni di contatto.

Infatti, qualora la scelta dovesse cadere sulla tensione di 220 V, occorre considerare l'onere conseguente la previsione di conduttori aventi una sezione maggiorata, rispetto quelli da prevedere per 380 V, a parità di potenza trasmessa, di circa due volte.

L'onere relativo alla spesa di primo acquisto non è il solo che necessita considerare, infatti anche le perdite d'energia relative al trasporto

della corrente, essendo grosso modo dipendenti dal quadrato del valore di questa, costituiscono un aggravio permanente di spesa.

D'altra parte contenendo il valore della tensione entro 220 V, si diminuiscono in modo sentito i rischi d'infortunio dovuti alle tensioni di contatto o ai contatti accidentali e l'impianto di protezione assume, dal lato economico, una fisionomia del tutto diversa da quella necessaria per i sistemi a 380 V con neutro a terra (1).

Non è da trascurare anche la possibilità, adottando trasformatori aventi una tensione secondaria di 220 V, di scegliere collegamenti a triangolo per i due avvolgimenti, ciò che consente una simmetria sentita nelle tensioni di fase, anche quando si dovessero verificare notevoli squilibri di carico.

Questo non è possibile qualora si scelga il valore di tensione di 380 V, poichè non essendo ammessa dalle Norme CEI una tensione maggiore di 220 V per l'impianto d'illuminazione, è da ritenere sommamente conveniente usare a questo scopo il valore di tensione esistente fra il conduttore neutro e un conduttore di fase, il che costringe ad effettuare il collegamento dell'avvolgimento secondario del trasformatore a stella con neutro accessibile.

Onde indicare un criterio di scelta fra le due soluzioni è opportuno rilevare che quando la potenza contemporanea necessaria all'alimentazione dell'impianto utilizzatore è contenuta entro limiti modesti (100÷÷160 kW) e quando la cabina di trasformazione può effettivamente essere costruita nel baricentro del carico, in modo da limitare il percorso dei conduttori e quindi le perdite d'energia è, conveniente scegliere la tensione di 220 V, mentre per tutti i casi che non rientrano in quelli esposti è necessario ricorrere alla tensione di 380 V.

---

(1) Per più ampie informazioni sugli impianti di protezione vedere BOSSI-COPPI, «*Impianti di terra*», Edizione Hoepli.

CAPITOLO III

DETERMINAZIONE DELLA POTENZA DEI TRASFORMATORI DA INSTALLARE NELLE CABINE FACENTI PARTE DI RETI DI DISTRIBUZIONE AD ANELLO A MAGLIA APERTA

Prima di passare ai particolari riguardanti la formulazione della richiesta d'offerta da inviare alle varie ditte costruttrici per l'acquisto di trasformatori, crediamo utile, per sommi capi, esporre i criteri di dimensionamento delle macchine da installare nelle cabine di trasformazione facenti parte di una rete di distribuzione, in quanto, sia la funzione di queste, che i fattori che concorrono alla determinazione, si distaccano nettamente da quelli fin qui esposti con particolare riguardo agli impianti industriali.

Condizioni che determinano il rinforzo o l'aggiunta di una cabina di trasformazione urbana

La costruzione di una cabina di trasformazione in una rete di distribuzione, suppone l'impiego di un capitale notevole e necessita quindi, perchè si addivenga alla decisione della realizzazione, che si determinino condizioni per le quali, sia economicamente che tecnicamente, si ritenga conveniente aggiungere, alle cabine esistenti, un nuovo centro di trasformazione.

Le cause più comuni, che creano queste condizioni, sono le seguenti:

— richieste di aumenti di carico da parte di vari utenti residenti in una certa zona del centro urbano, e alle quali non si possa convenientemente sopperire mediante aumenti di potenza da effettuarsi nelle cabine esistenti;

— sviluppo verticale degli edifici (le necessità energetiche di un grattacielo o di una casa di abitazione di 10÷12 piani sono ben diverse da quelle di normali case di 2÷3 piani);

— richieste di potenza per impianti industriali che sorgono nella zona;

— costruzione di nuovi agglomerati urbani, posti in genere nelle zone periferiche delle città, e per i quali occorre prevedere centri di trasformazione sufficienti a coprire le necessità energetiche della nuova utenza.

Determinazione del valore di potenza da installare nella cabina

Una volta decisa la costruzione della cabina è necessario definire il valore della potenza del trasformatore che in essa deve essere installato. I tecnici preposti a questo compito devono avere presenti i seguenti concetti:

— concetto di coefficiente di contemporaneità;

— concetto di potenza di riserva;

— concetto di incremento annuo nell'aumento dei consumi d'energia;

— concetto di potenza presunta;

— valore del fattore di potenza totale dell'utenza.

Vediamo ora di spiegare in termini chiari i concetti esposti al fine che il lettore si possa rendere ragione di come si arriva al dimensionamento delle macchine.

Concetto di coefficiente di contemporaneità.

Quando la costruzione della cabina è determinata dal sommarsi di richieste plurime di potenza, è necessario supporre che ogni singolo utente abbia tenuto conto, nell'indicare il valore della potenza che ritiene indispensabile per l'alimentazione degli utilizzatori installati nel suo impianto, dei fattori di utilizzazione e di contemporaneità, atti a ridurre la somma delle potenze installate al vero valore che verrà impiegato, in altre parole è lecito supporre che i 10, o i 20, o i 40 kW richiesti, siano veramente il valore della potenza contemporanea che gli necessita, e in questo caso, sembrerebbe intuitivo, che, la potenza da installare nella cabina, dovesse essere determinata dalla somma delle potenze richieste.

Ciò non è affatto vero, in quanto sarà ben difficile che tutti gli utenti, in modo contemporaneo, assorbano la massima punta della potenza impegnata, e occorre quindi tener conto di un coefficiente di riduzione, ossia di un certo valore, ricavato dall'esperienza, che moltiplicato per la somma delle potenze, fornirà il valore effettivo della potenza contemporanea che è necessario mettere a disposizione del complesso di utenti dipendenti dalla cabina.

Questo coefficiente, si rileva dalla tabella 40 seguendo il metodo indicato nella nota.

TABELLA N. 40 – **Fattori di contemporaneità (f_c) in funzione del coefficiente α**

α	f_c	α	f_c	α	f_c
1,05	0,977	3,10	0,583	10	0,336
1,10	0,955	3,20	0,574	11	0,321
1,15	0,935	3,30	0,566	12	0,308
1,20	0,917	3,40	0,559	13	0,297
1,25	0,900	3,50	0,552	14	0,286
1,30	0,884	3,60	0,544	15	0,277
1,35	0,868	3,70	0,538	16	0,269
1,40	0,852	3,80	0,531	17	0,261
1,45	0,838	3,90	0,525	18	0,254
1,50	0,824	4	0,518	19	0,248
1,55	0,819	4,20	0,506	20	0,242
1,60	0,797	4,40	0,495	22	0,231
1,65	0,786	4,60	0,485	24	0,221
1,70	0,776	4,80	0,475	26	0,214
1,75	0,766	5	0,466	28	0,206
1,80	0,756	5,20	0,458	30	0,199
1,85	0,747	5,40	0,450	32	0,193
1,90	0,738	5,60	0,442	34	0,188
1,95	0,729	5,80	0,434	36	0,183
2	0,720	6	0,427	38	0,178
2,10	0,703	6,20	0,420	40	0,174
2,20	0,688	6,40	0,413	45	0,164
2,30	0,673	6,60	0,407	50	0,157
2,40	0,660	6,80	0,402	55	0,150
2,50	0,648	7	0,397	60	0,143
2,60	0,636	7,5	0,384	70	0,133
2,70	0,625	8	0,373	80	0,125
2,80	0,613	8,5	0,362	90	0,118
2,90	0,603	9	0,353	100	0,113
3	0,593	9,5	0,344		

Per ottenere il valore del coefficiente di contemporaneità è necessario eseguire la somma dei vari carichi, e calcolare il rapporto fra il valore ottenuto e il carico maggiore. In corrispondenza del valore del rapporto $\varkappa$, nella tabella, si ottiene il valore del coefficiente *fe*.

Se per esempio i carichi da considerare fossero i seguenti:

35 — 10 — 15 — 10 — 5 — 60 — 30 — 25 kW occorre operare nel seguente modo:

$$\alpha = \frac{35 + 10 + 15 + 10 + 5 + 60 + 30 + 25}{60} = \frac{180}{60} = 3.$$

Il coefficiente di contemporaneità (*fe*) è quindi 0,593 per cui moltiplicando 180 × 0,593 si ottiene una potenza di 106,740 kW.

Concetto di potenza di riserva.

Nel calcolo della potenza da installare in una cabina di nuova costruzione, da inserire fra altre già esistenti, occorre tener conto della possibilità che una delle cabine adiacenti, possa, per qualsiasi causa, essere staccata, ossia che, per un certo periodo, non sia possibile, con questa, alimentare l'utenza dipendente.

Le cause per le quali possono verificarsi queste condizioni anormali sono le seguenti:

— guasti al trasformatore;
— guasti agli elettrodotti di alimentazione a media tensione;
— lavori di rifacimento inerenti le apparecchiature o il locale nel quale la cabina è installata.

Non è possibile pensare che una cabina sia attrezzata in modo tale da costituire, in ogni caso, una potenza sufficiente a sostituire integralmente una cabina vicina, in quanto lo spreco di potenza che ne consegue, inciderebbe notevolmente sul razionale sfruttamento delle macchine, è però possibile che il carico di una cabina possa essere ripartito fra più cabine adiacenti e a questa connesse mediante elettrodotti a bassa tensione.

Tenendo conto di questo, la potenza, determinata secondo il concetto di contemporaneità, dovrà essere aumentata di una certa quota che costituisce la potenza di riserva.

In linea del tutto generale l'aumento si aggira sul 15%.

Concetto di incremento.

Quando si costruisce una cabina non è sufficiente determinare il valore della potenza necessaria per sopperire alle necessità immediate, ma occorre prevedere quello che avverrà nel periodo di tempo di un anno, in quanto l'andamento del carico difficilmente rimarrà costante, ma subirà un aumento pressochè continuo dovuto all'espandersi capillare nell'uso degli elettrodomestici, per le utenze residenziali, mentre, per le utenze industriali, si avrà un aumento di assorbimento determinato da necessità di maggiore produzione.

In genere il fattore di incremento annuo si calcola in un 7% della potenza installata, in modo da prevedere la necessità energetiche degli utenti almeno per due anni.

Evidentemente il valore di questo fattore è ricavato dalla media d'incremento annuo generale e può, nel caso singolo, dimostrarsi eccessivo o scarso.

In entrambi i casi, durante l'esercizio, i rilievi del carico forniranno gli elementi atti alla correzione di eventuali errori dovuti a condizioni particolari.

Concetto di potenza presunta.

Non sempre si può conoscere a priori quali saranno le necessità degli utenti che occorre soddisfare, poichè, quando si progetta una cabina per l'alimentazione di un nuovo centro residenziale, non è possibile avere a disposizione gli elementi di calcolo.

Si ricorre allora al concetto di potenza presunta, ossia si ricorre ad un calcolo approssimativo che tiene conto della cubatura totale delle costruzioni che verranno servite dalla nuova cabina.

L'esperienza ha insegnato che per quartieri residenziali, escludendo quindi utenti industriali, la potenza presunta da installare in una cabina di trasformazione, atta a questo scopo, è data dalla cubatura totale delle costruzioni moltiplicata per $3 \div 4$ Watt ogni metro cubo.

Fattore di potenza.

Tutto quello che abbiamo esposto presume la determinazione del valore di potenza resa espresso in chilowatt, mentre come abbiamo già detto la potenza nominale dei trasformatori, secondo le Norme CEI 1953, non solo si riferisce alla potenza assorbita, ma è espressa in chilo-

voltampere, il che presume l'introduzione nel calcolo delle perdite di trasformazione e del fattore di potenza relativo all'impianto utilizzatore, ossia il valore del fattore di potenza totale dell'utenza.

Mentre per la prima maggiorazione sarà sufficiente avvalersi della tabella 28 nella quale sono espresse le perdite dei trasformatori unificati, per il valore del fattore di potenza dovremo senz'altro riferirci a quello medio mensile espresso nei contratti di fornitura ossia a 0,8.

Le considerazioni esposte per la suddivisione della potenza in più macchine, riferita alle cabine per impianti industriali, non hanno valore in questo caso, sia per l'impossibilità di adeguare la potenza all'effettiva consistenza del carico, sia perchè ogni Azienda elettrica di distribuzione possiede certamente macchine di riserva da sostituire nel caso di guasto, o quando sia necessario staccare la macchina per interventi di manutenzione.

CAPITOLO IV

RICHIESTA DI OFFERTA PER LA COSTRUZIONE DEI TRASFORMATORI

Una volta che il tecnico progettista di un impianto elettrico, è giunto, attraverso le considerazioni sin qui esposte, alla determinazione dei parametri principali che caratterizzano i trasformatori da usare, occorre che egli rediga la richiesta di offerta per la costruzione delle macchine da inviare ai fabbricanti, per poi addivenire all'ordinazione.

La richiesta d'offerta può rispecchiare tre casi:

— richiesta d'offerta per trasformatori unificati;
— richiesta d'offerta per trasformatori non unificati;
— richiesta d'offerta per trasformatori che devono agire in parallelo con unità preesistenti.

Vediamo prima di tutto cosa s'intende per trasformatori unificati, un termine che è ricorso più volte nella trattazione.

La sezione tecnologica dell'Associazione Nazionale Industrie Elettriche (ANIDEL) attraverso un lungo studio e avvalendosi della vastissima esperienza che nei riguardi dei trasformatori avevano le Aziende distributrici dell'energia, ha provveduto, fino dal 1959, a elaborare un « capitolato per la costruzione dei trasformatori trifase in olio », con particolare riguardo ai tipi normalmente usati nella distribuzione.

Nel capitolato, che crediamo utile riportare per esteso, sono stati unificati i seguenti dati:

— tensione nominale d'isolamento;
— potenza nominale;
— regolazione del rapporto di trasformazione;
— valori delle perdite nel rame e nel ferro;
— valori della corrente a vuoto;
— valore della tensione percentuale di corto circuito;
— caratteristiche costruttive varie.

Avvalendosi di questo capitolato, il tecnico che deve provvedere all'ordinazione di trasformatori, non solo ne conosce in anticipo le caratteristiche più importanti, ma sa di ordinare macchine la cui costruzione risponde perfettamente alle esigenze di una rete di distribuzione della quale fa parte anche la cabina che egli ha progettato, inoltre con ciò ottiene di contenere l'onere entro limiti minimi, perchè la maggior parte degli elementi che compongono la macchina sono, in genere, il risultato di una produzione di serie.

Occorre considerare anche che, dovendo giudicare fra le offerte di varie ditte, trattandosi di prodotti univoci, il giudizio potrà essere limitato alla pura convenienza economica, pur avendo la completa sicurezza di ottenere con il minor onere un prodotto equivalente.

CAPITOLATO ANIDEL PER L'ACQUISTO DEI TRASFORMATORI DI DISTRIBUZIONE TRIFASE IN OLIO

1) *Rispondenza alle Norme.*

I trasformatori devono rispondere a tutte le prescrizioni e superare le prove indicate nelle Norme CEI vigenti (14-1, 14-2, 14-3).

2) *Tensione nominale di isolamento* (1).

La tensione nominale di isolamento deve essere una delle seguenti:

10 kV 15 kV 20 kV 30 kV.

3) *Potenza nominale.*

La potenza nominale deve essere una delle seguenti:

- per tensioni nominali di isolamento di 10 kV, 15 kV e 20 kV:
  25 kVA - 40 kVA - 63 kVA - 100 kVA - 125 kVA - 160 kVA - 200 kVA - 250 kVA - 315 kVA - 400 kVA - 500 kVA;
- per tensione nominale di isolamento di 30 kV:
  40 kVA - 63 kVA - 100 kVA - 125 kVA - 160 kVA - 200 kVA - 250 kVA 315 kVA - 400 kVA - 500 kVA.

4) *Schemi di collegamento.*

Lo schema di collegamento deve essere scelto, a cura del costruttore, fra quelli del Gruppo 11 (spostamento angolare 330°) con neutro di bassa tensione esterno.

---

(1) Il presente Capitolato non indica i valori delle tensioni nominali dei trasformatori, valori che dovranno essere quindi fissati in sede di ordinazione: si precisa d'altra parte che le tensioni secondarie dovranno in ogni caso essere scelte in modo da soddisfare alle prescrizioni della legge n. 105 dell'8 marzo 1949 sull'unificazione delle tensioni di distribuzione e successive modificazioni.

5) *Regolazione del rapporto di trasformazione.*

I trasformatori devono consentire la regolazione del rapporto di trasformazione da effettuare mediante inseritore di spire sull'avvolgimento di alta tensione, manovrabile a trasformatore staccato dalla rete. Tale inseritore deve avere tre posizioni corrispondenti a variazioni del rapporto di trasformazione non superiori al ± 5%.

6) *Caratteristiche elettriche.*

a) Perdite, tensione di corto circuito e corrente a vuoto.

I valori delle perdite (nel ferro e nel rame), della tensione di corto circuito e della corrente a vuoto devono essere quelli indicati nella tabella 41, con le tolleranze ammesse dalle vigenti Norme CEI. Tali valori si riferiscono al rapporto di trasformazione intermedio e sono validi solo per trasformatori che abbiano solo i tre rapporti di trasformazione di cui al precedente punto 5).

TABELLA N. 41 – **Perdite, corrente a vuoto e tensione di corto circuito.**

kVA	Classe 10 e 15 kV			Classe 20 kV			Classe 30 kV			Tensione di c.c. %
	W_{Cu}	W_{Fe}	I_0 %	W_{Cu}	W_{Fe}	I_0 %	W_{Cu}	W_{Fe}	I_0 %	
25	510	102	2,8	570	115	3,5	—	—	—	
40	725	145	2,6	810	162	3,3	800	180	4,0	
63	1 020	206	2,4	1 130	230	3,1	1 230	250	3,8	
100	1 450	296	2,3	1 600	326	2,9	1 740	354	3,6	
125	1 720	352	2,2	1 900	388	2,7	2 060	418	3,4	
160	2 080	426	2,1	2 300	468	2,5	2 480	505	3,2	4,2
200	2 470	505	2,0	2 730	555	2,4	2,940	600	3,0	
250	2 920	600	1,9	3 230	660	2,3	3,480	710	2,8	
315	3 470	720	1,8	3 840	790	2,2	4 140	850	2,6	
400	4 160	865	1,75	4 600	945	2,1	4 950	1 020	2,5	
500	4 920	1 030	1,7	5 440	1 120	2,0	5 850	1 210	2,4	

b) Variazioni delle perdite nel ferro e della corrente a vuoto al variare della tensione.

Con tensione pari al 110% di quella nominale i valori delle perdite nel ferro e della corrente a vuoto non devono superare il 140% e rispettivamente il 200% di quelli indicati nella tabella sopra citata [1].

[1] Queste percentuali sono relative a trasformatori con lamierini a cristalli orientati, trasformatori ai quali si riferiscono le caratteristiche indicate nel presente capitolato.

TABELLA 42 – **Posizione dei golfari nei trasformatori unificati.**

Potenza kVA	Posizione dei golfari				
	L min				*D* mm
	Per tensione nominale di isolamento di:				
	10 kV	15 kV	20 kV	30 kV	
25	120	140	140	140	60
40	120	140	140	140	60
63	120	140	140	140	60
100	150	150	150	160	60
125	150	150	150	160	60
160	150	150	150	180	60
200	150	180	180	180	60
250	150	180	180	200	60
315	180	200	200	200	60
400	180	200	200	220	60
500	180	200	200	220	60

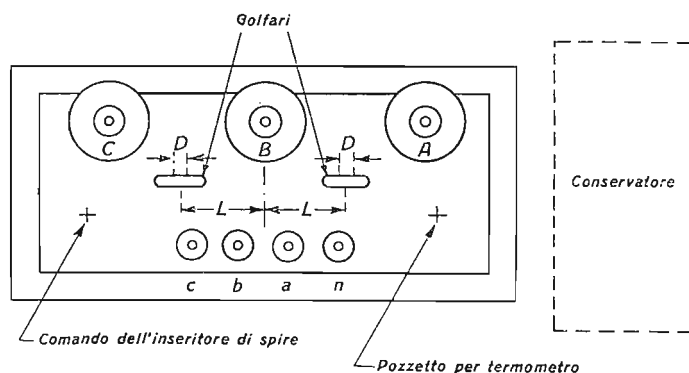



Fig. 51 – Disposizione degli elementi sul coperchio del trasformatore.

7) *Caratteristiche costruttive.*

a) Generalità.

I trasformatori devono avere isolamento coordinato (Norme CEI 14-1, art. 5.3.03, *b*) e devono essere previsti per essere sottoposti alla prova ad impulso ed alla prova di corto circuito a tensione nominale [1].

[1] In attesa della pubblicazione di prescrizioni italiane per l'esecuzione della prova di corto circuito a tensione nominale, tale prova deve essere eseguita alimentando il trasformatore con la bassa tensione in corto circuito e per la durata di 2 s, con la tensione primaria nominale.

b) Tipo e posizione dei passanti.

I passanti devono essere del tipo unificato per esterno, disposti sul coperchio del trasformatore come indicato in fig. 51.

c) Apertura dello spinterometro di coordinamento.

Per ciascuna delle classi di isolamento previste, l'apertura dello spinterometro di coordinamento, quando esiste, deve essere quella indicata nella tabella seguente:

TABELLA N. 43 - **Distanze in millimetri fra gli elettrodi dello spinterometro di coordinamento in funzione della tensione nominale di isolamento.**

Tensione nominale di isolamento kV	Apertura dello spinterometro di coordinamento a (mm)
10	110
15	135
20	170
30	235

d) Distanze tra le parti in tensione e verso massa.

Le distanze fra le parti in tensione e verso massa devono essere tali da sodisfare le Norme relative al coordinamento dell'isolamento.

8) *Accessori.*

a) Inseritore di spire.

L'organo di manovra dell'inseritore di spire deve essere disposto sul coperchio del trasformatore vicino al lato opposto a quello del morsetto del neutro di bassa tensione.

La posizione dell'inseritore di spire deve essere contraddistinta da un apposito dispositivo che fornisca le indicazioni: +, o, —, a seconda se sono inserite tutte (+) o parte delle spire (« o » o « — »). Tali indicazioni devono essere riprodotte in caratteri alti circa 20 mm ed essere disposte in modo da essere facilmente leggibili anche a trasformatore in servizio.

b) Conservatore d'olio.

I trasformatori devono essere muniti di conservatore d'olio disposto sul lato corto del trasformatore più vicino al morsetto del neutro di bassa tensione.

Il conservatore deve essere provvisto di:

— due livelli lenticolari con marche di livello a — 5 °C, 20 °C e 85 °C, disposti sui due fianchi corti del conservatore;
— dispositivo di spurgo;
— dispositivo per la respirazione del trasformatore;
— dispositivo per l'immissione dell'olio con diametro di almeno 50 mm;
— per i soli trasformatori da 400 kVA e 500 kVA, tratto di tubo asportabile per l'inserzione di relè a sviluppo di gas nella tubazione fra cassone e conservatore.

Tra il conservatore ed il cassone non devono essere installati rubinetti.

c) Rulli di scorrimento.

I trasformatori di potenza superiore a 100 kVA — ed anche a quelli di potenza uguale o inferiore, se precisato in sede di ordinazione — devono essere provvisti di rulli di scorrimento, rispondenti alla fig. 52, che possano essere inseriti, a scartamento invariato, in modo da ottenere lo spostamento nelle due direzioni principali.

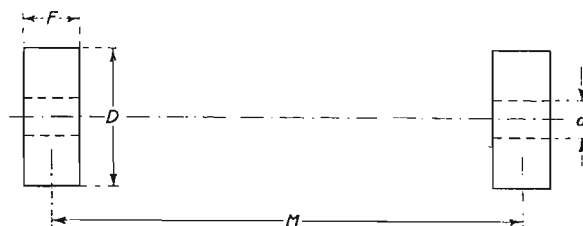



Fig. 52 – Rulli di scorrimento.

TABELLA N. 44 – **Dimensioni dei rulli di scorrimento per trasformatori trifase a due avvolgimenti, isolati in olio, a raffreddamento naturale, espresse in millimetri in funzione della potenza nominale della macchina.**

Potenza nominale kVA	Dimensioni in mm			
	D	*F*	*d*	*M*
25 ÷ 100	100	40	22	420
125	100	40	22	500
160 ÷ 315	150	60	35	500
400 ÷ 500	150	60	35	650

d) Dispositivo di scarico dell'olio.

I trasformatori devono essere provvisti di un dispositivo di scarico dell'olio, che ne permetta lo spillamento graduale, terminante con un raccordo lungo 30 mm, filettato 1¼ gas UNI 362.

Tale dispositivo deve essere situato sulla base del fianco del trasformatore in corrispondenza del quale è installato il conservatore ed in posizione e con lunghezza tale da non sporgere dalla sagoma di ingombro del cassone.

e) Dispositivi per la misura della temperatura dell'olio.

I trasformatori devono essere provvisti di un pozzetto per l'apposizione di un termometro per la misura della temperatura dell'olio negli strati superiori.

Tale pozzetto deve essere disposto in prossimità del lato corto del trasformatore vicino al morsetto di neutro, di bassa tensione. Il pozzetto stesso deve essere costituito da un tubo ¾ gas, lungo 120 mm, a fondo cieco, sporgente per 30 mm dal coperchio del cassone e filettato esternamente per circa 20 mm.

Fig. 53 – Morsetto di terra.

f) Altri accessori.

I trasformatori devono essere inoltre muniti di:

— due morsetti di terra, rispondenti alle dimensioni di fig. 53, situati alla base dei due fianchi corti del trasformatore;

— due golfari per il sollevamento sia del trasformatore completo sia della sola parte estraibile, disposti come in figura 51 e con fori il cui diametro sia di 60 mm;

— due targhe, disposte sui due fianchi lunghi del trasformatore, riportanti le indicazioni previste dalle Norme CEI, nonchè i valori del peso totale del trasformatore e del peso dell'olio;

— due porta targhe, disposte sui due fianchi lunghi del trasformatore, di dimensioni 105 × 148 mm;

— un termometro a quadrante, se richiesto in sede di ordinazione;

— un relè a sviluppo di gas, se richiesto in sede di ordinazione.

Richiesta d'offerta per trasformatori unificati

Quando il tecnico progettista intenda avvalersi del capitolato esposto la richiesta d'offerta deve contenere i seguenti dati:

— numero delle macchine:

— valore della tensione d'isolamento da scegliere fra i quattro valori riportati nel capitolato tenendo presente che, qualora non vi siano ragioni di coordinamento con macchine preesistenti, questo valore deve essere quello immediatamente superiore alla tensione d'esercizio;

— valore della tensione di alimentazione (valore medio indicato dall'Azienda distributrice);

— valore della tensione nominale secondaria a vuoto;

— valore della potenza nominale da scegliere fra quelli esposti nel capitolato, in corrispondenza alle tensioni d'isolamento;

— collegamenti degli avvolgimenti primari e secondari e indicazioni del gruppo (nell'ambito del gruppo 11).

Dopo questi dati sarà sufficiente indicare la seguente dicitura:

— per il valore delle perdite, la tensione di corto circuito, la consistenza del variatore di tensione e gli accessori, la macchina deve rispondere al capitolato ANIDEL.

Occorrerà inoltre precisare se si ritiene necessario che sulla macchina debba essere montato il relè ad espansione di gas e il termometro.

Richiesta d'offerta per trasformatori non unificati

Quando per ragioni particolari non s'intenda avvalersi del capitolato ANIDEL la richiesta d'offerta deve contenere i seguenti dati:

— numero delle macchine;

— indicazione del tipo di lamierino che deve essere usato (a cristalli orientati o semplici lamierini legati al silicio);

— indicazione del tipo d'isolamento (olio o aria);

— indicazione del tipo di raffreddamento, naturale o forzato. Nel secondo caso occorre indicare il fluido raffreddante aria o acqua;

— tipo di esecuzione (per interno o per esterno);

— valore della tensione d'isolamento;

— valore medio della tensione primaria d'esercizio;

— valore della tensione nominale secondaria a vuoto;

— collegamenti degli avvolgimenti;

— gruppo d'appartenenza (0-5-6-11);

— indicazione di accessibilità o meno del morsetto neutro;

— valore della potenza nominale;

— valore della tensione percentuale di corto circuito desiderata.

Fra gli accessori dovrà essere indicato il variatore di tensione, che potrà essere manovrabile sottocarico o a macchina disinserita, ripor-

tando nella richiesta i valori delle tensioni corrispondenti alle posizioni del commutatore:

— essiccatore d'aria a gel di silice o d'altra natura;
— conservatore d'olio a uno o due livelli;
— termometro indicatore, o con contatto di massima temperatura tarabile;
— relè ad espansione di gas con uno o due contatti;
— dimensioni di ingombro approssimative della macchina;
— interassi fra i rulli di scorrimento orientabili, qualora questa distanza debba corrispondere a manufatti esistenti.

L'esame delle offerte che verranno inviate dai costruttori si presenta in questo caso molto meno semplice in quanto l'indicazione del costo non può avere un influsso decisivo sull'assegnazione dell'ordine, dovendo confrontare, soprattutto, i valori delle perdite che il costruttore dovrà chiaramente indicare.

Infatti, il valore delle perdite esprime in definitiva il costo della trasformazione e rappresenta un onere continuo al quale è necessario sottostare, quindi il trasformatore sarà tanto più pregiato quanto minore sarà questo valore, tenendo conto che le perdite nel ferro, o perdite a vuoto, sono continuamente presenti e che moltiplicate per 24 ore forniscono il valore giornaliero dell'energia assorbita dalla rete per il funzionamento della macchina, mentre le perdite nel rame sono proporzionali al carico e assumono il loro massimo valore quando la macchina eroga la corrente nominale.

Nell'esame delle offerte l'indicazione del valore delle perdite dovrebbe avere un peso decisivo nella scelta del costruttore, e quindi nell'assegnazione dell'ordine ricordando che, a parità di perdite e di costo, è consigliabile preferire la macchina più pesante in quanto con lo stesso onere si acquista una maggiore quantità di materiale.

Richiesta d'offerta per trasformatori destinati a funzionare in parallelo con macchine preesistenti

La richiesta d'offerta, in questo caso particolare, oltre al numero delle macchine e alla potenza nominale, deve contenere tutti i dati relativi ai trasformatori con i quali le nuove unità dovranno funzionare in parallelo, rilevati, se possibile, dal bollettino di prova.

Oltre ai dati suesposti è opportuno aggiungere tutte le notizie atte a facilitare la ricerca d'archivio, quando ci si rivolga allo stesso fornitore dell'unità funzionante ossia:

— il numero della macchina;
— il tipo;
— il numero di commessa;
— l'anno di costruzione;

tutti dati che dovrebbero essere reperibili sulla targa, (vedere a pag. 14).

A titolo informativo rammentiamo che il funzionamento in parallelo dei trasformatori è conveniente, al limite, quando il valore del rapporto fra le potenze nominali è uguale o inferiore a 3.

Nella tabella 45 abbiamo riportato le misure di ingombro e i pesi che assumono i vari trasformatori in funzione della potenza.

I dati sono riferiti alla classe 10 kV.

Nella tabella 46, per comodità del lettore, abbiamo riportato il numero e la potenza nominale dei trasformatori, che è consigliabile scegliere, in funzione della potenza installata nell'impianto utilizzatore, del coefficiente complessivo ottenuto dai fattori di contemporaneità e di utilizzazione, supponendo un valore del fattore di potenza uguale a 0,8.

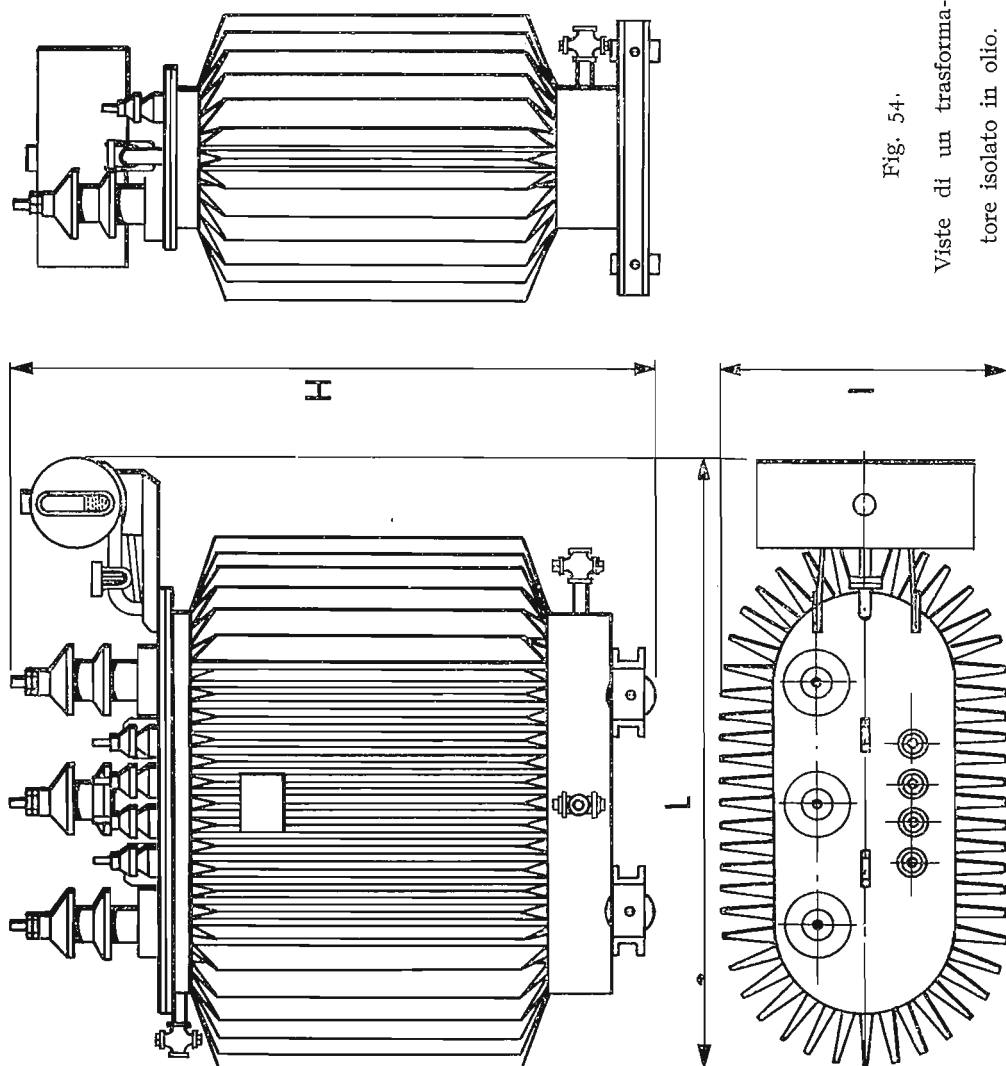



Fig. 54.
Viste di un trasformatore isolato in olio.

TABELLA N. 45 – **Dimensioni d'ingombro e pesi indicativi per trasformatori trifase in olio a due avvolgimenti a raffreddamento naturale.**

	PESI (kg)																			
Potenza nominale	10	16	25	40	50	63	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600
Ferro	45	60	82	111	131	153	176	209	248	297	348	421	501	595	716	930	1095	1286	1490	1770
Rame	27	36	48	62	74	88	103	125	147	177	198	233	261	307	376	396	472	563	700	830
Olio	70	85	100	120	140	160	180	200	250	280	350	380	460	580	710	1000	1100	1350	1600	1850
Parte estraibile .	120	150	190	230	270	310	350	410	480	570	650	780	900	1060	1280	1590	1830	2220	2630	3150
Totale netto ...	245	290	360	435	510	800	880	770	900	1080	1260	1540	1800	2160	2580	3340	4150	4900	5700	6800
	INGOMBRI NETTI (mm)																			
Lunghezza L ...	1050	1050	1100	1200	1250	1300	1300	1350	1400	1450	1500	1550	1600	1650	1700	1800	1900	2000	2100	2200
Larghezza l	400	450	500	500	550	800	650	650	700	750	800	850	900	950	1000	1050	1100	1150	1200	1250
Altezza (H)	1200	1250	1300	1350	1400	1450	1450	1450	1500	1600	1700	1800	1900	2100	2300	2500	2700	3000	3200	3400
	INGOMBRI CON IMBALLAGGIO (mm)																			
Lunghezza (L) .	1150	1150	1200	1300	1350	1400	1400	1450	1500	1550	1600	1650	1700	1800	1850	1950	2030	2150	2250	2350
Larghezza (l_1) ..	500	550	600	600	650	700	750	750	800	850	900	950	1000	1100	1150	1200	1250	1300	1350	1400
Altezza (M_1) ...	1450	1500	1550	1630	1700	1750	1800	1900	2000	2100	2200	2300	2400	2700	2900	3200	3300	3700	3900	4100
Volume (m^3) ...	0.9	1	1.1	1.3	1.5	1.7	1.9	2.1	2.4	2.8	3.2	3.6	4.1	5.4	6.2	7.5	9.5	10.4	11.9	13.5
Peso (kg)	40	50	65	80	100	120	140	180	180	210	250	300	350	400	500	550	650	650	750	950

TABELLA N. 46 — **Potenza nominale e numero dei trasformatori che è consigliabile scegliere in funzione della potenza installata e del coefficiente complessivo di riduzione, per impianti funzionanti con un fattore di potenza uguale a 0,8.**

Somma delle potenze degli utilizzatori installati (kW)	Coefficiente di riduzione complessivo	Potenza nominale a $\cos \varphi$ = 0,8 + perdite (kVA) ~	Potenza nominale e numero dei trasformatori da scegliere (kVA)
100	0,6	80	1 × 100
100	0,5	68	1 × 100
100	0,4	53	1 × 63
100	0,3	40	1 × 63
150	0,6	118	1 × 160
150	0,5	99	1 × 160
150	0,4	79	1 × 100
150	0,3	60	1 × 100
150	0,2	46	1 × 63
200	0,6	159	2 × 100
200	0,5	128	1 × 160
200	0,4	106	1 × 160
200	0,3	80	1 × 100
200	0,2	53	1 × 63
250	0,6	198	1 × 100 + 1 × 160
250	0,5	165	2 × 100
250	0,4	132	1 × 160
250	0,3	100	1 × 160
250	0,2	66	1 × 100
300	0,6	238	1 × 100 + 1 × 160
300	0,5	199	1 × 100 + 1 × 160
300	0,4	159	2 × 100
300	0,3	118	1 × 160
300	0,2	64	1 × 100
400	0,6	318	2 × 160
400	0,5	265	2 × 160
400	0,4	212	1 × 100 + 1 × 160
400	0,3	159	2 × 100
400	0,2	106	1 × 160

(segue)

(seguito)

Somma delle potenze degli utilizzatori installati (kW)	Coefficiente di riduzione complessivo	Potenza nominale a cos φ = 0,8 + perdite (kVA) ~	Potenza nominale e numero dei trasformatori da scegliere (kVA)
500	0,6	396	1 × 200 + 1 × 250
500	0,5	328	1 × 200 + 1 × 160
500	0,4	265	2 × 160
500	0,3	199	1 × 100 + 1 × 160
500	0,2	132	1 × 160
600	0,6	477	2 × 250
600	0,5	398	1 × 200 + 1 × 250
600	0,4	318	1 × 160 + 1 × 200
600	0,3	248	2 × 160
600	0,2	159	2 × 100
700	0,6	555	2 × 315 + 1 × 15 o 30
700	0,5	401	2 × 250
700	0,4	372	1 × 200 + 1 × 250
700	0,3	276	2 × 200
700	0,2	188	1 × 100 + 1 × 160
800	0,6	636	1 × 400 + 1 × 315 + 1 × 30
800	0,5	530	2 × 315 + 1 × 15 o 30
800	0,4	409	2 × 250
800	0,3	318	2 × 200
800	0,2	212	2 × 160
900	0,6	720	2 × 400 + 1 × 30
900	0,5	595	1 × 315 + 1 × 400 + 1 × 30
900	0,4	477	2 × 250
900	0,3	360	1 × 200 + 1 × 250
900	0,2	239	2 × 160
1000	0,6	795	1 × 400 + 1 × 500 + 1 × 30 3 × 315 + 1 × 30
1000	0,5	667	3 × 250
1000	0,4	530	3 × 315 + 1 × 15 o 30
1000	0,3	398	1 × 200 + 1 × 250
1000	0,2	265	2 × 160

(segue)

(seguito)

Somma delle potenze degli utilizzatori installati (kW)	Coefficiente di riduzione complessivo	Potenza nominale a cos φ = 0,8 + perdite (kVA) ~	Potenza nominale e numero dei trasformatori da scegliere (kVA)
1250	0,6	995	4 × 315 + 1 × 15 o 30
1250	0,5	827	3 × 315 + 1 × 15 o 30
1250	0,4	667	3 × 250
1250	0,3	493	2 × 315 + 1 × 15 o 30
1250	0,2	334	2 × 200
1500	0,6	1175	3 × 400 + 1 × 30
1500	0,5	996	1 × 315 + 2 × 400 + 1 × 30
1500	0,4	795	3 × 315 + 1 × 15 o 30
1500	0,3	595	3 × 250
1500	0,2	400	2 × 250
2000	0,6	1590	3 × 600 + 1 × 30
2000	0,5	1315	3 × 500 + 1 × 30
2000	0,4	1060	3 × 400 + 1 × 30
2000	0,3	795	3 × 315 + 1 × 15 o 30
2000	0,2	530	2 × 315 + 1 × 15 o 30

CAPITOLO V

CRITERI D'INSTALLAZIONE DEI TRASFORMATORI

Generalità

L'installazione dei trasformatori intesa in senso generico comprende tre argomenti ossia:

— immissione del trasformatore nel locale adibito a cabina di trasformazione;

— opere e accorgimenti necessari al raffreddamento della macchina;

— opere e accorgimenti per la raccolta e l'eventuale spegnimento dell'olio contenuto nel trasformatore.

IMMISSIONE DEL TRASFORMATORE NEL LOCALE ADIBITO A CABINA DI TRASFORMAZIONE

Nella tabella 45 abbiamo raccolto i dati indicativi riguardanti le dimensioni e i pesi relativi a trasformatori isolati in olio a raffreddamento naturale, normalmente usati nelle cabine di trasformazione per impianti industriali.

Come è possibile rilevare, a seconda del valore della potenza nominale, il peso e le dimensioni d'ingombro possano assumere valori notevoli, tali comunque da suscitare problemi abbastanza onerosi in relazione al trasporto allo scaricamento dal mezzo, e all'adduzione nel locale della cabina.

Tralasciamo volutamente quanto riguarda il trasporto di grandi unità di trasformazione aventi potenze nominali notevoli e destinate, in genere, alle stazioni di trasformazione insite nelle reti di distribuzione, per considerare le difficoltà che si presentano quando occorra immettere in una cabina adatta alla alimentazione di impianti industriali, la macchina o le macchine previste.

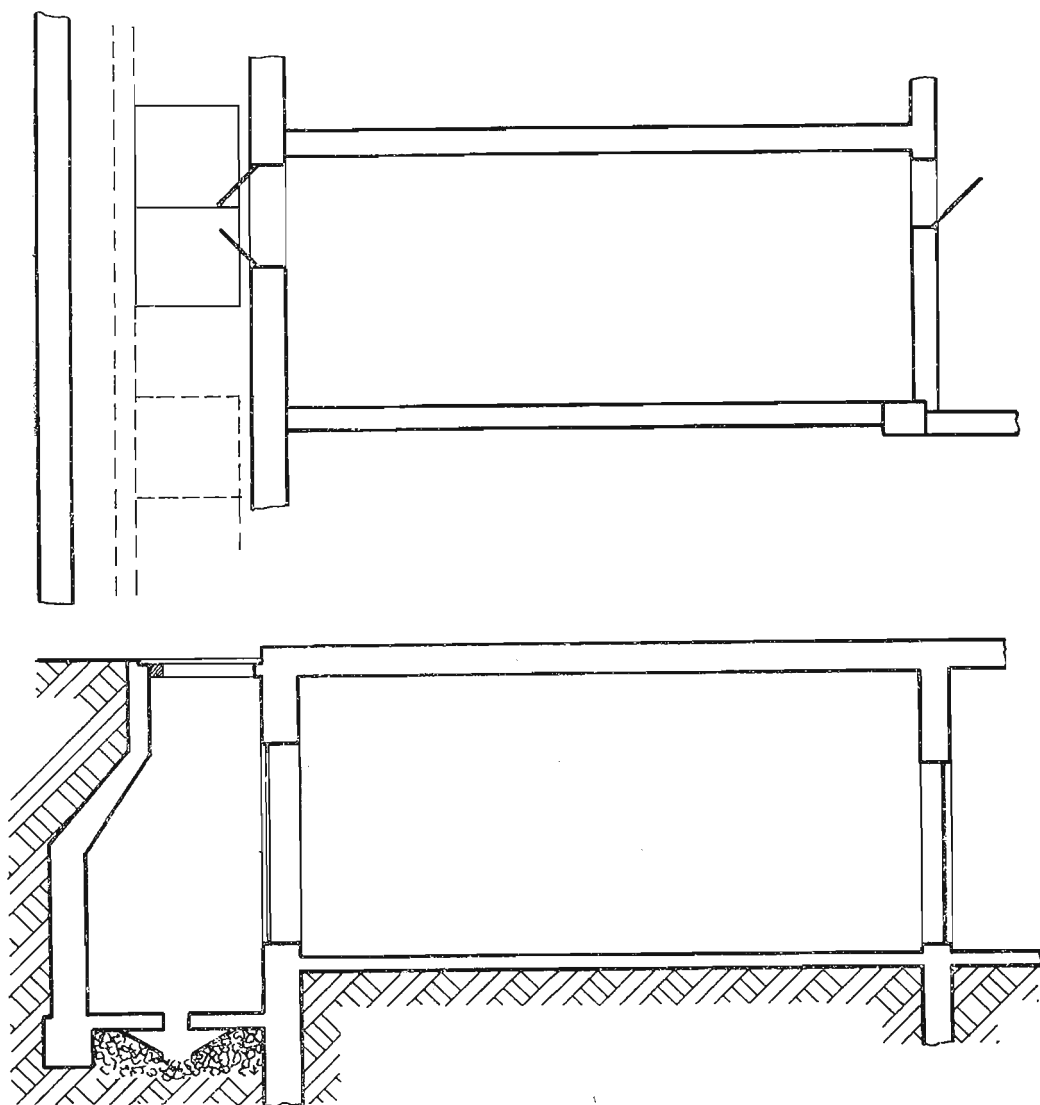



Fig. 55 – Vista in pianta e in sezione del locale di una cabina di trasformazione posto nello scantinato, con botola per calo trasformatore.

I locali adibiti a cabina di trasformazione possono avere due ubicazioni, ossia al piano terra o nello scantinato.

Se il locale è situato a piano terra, oppure se il locale nello scantinato è raggiungibile mediante una botola di dimensioni sufficienti (fig. 55)

le difficoltà si compendiano nello scarico della macchina dal mezzo di trasporto; mentre, quando l'accesso al locale della cabina deve avvenire attraverso una o più rampe di scale; è necessario porre in atto tutta una serie di accorgimenti al fine di condurre a buon termine l'operazione che, tutt'altro che facile, può causare gravi inconvenienti e mettere in pericolo, sia l'integrità fisica degli operatori che la macchina, quando in special modo si tratti di trasformatori isolati in aria.

Locale a piano terreno

Il trasformatore, caricato su un autocarro dal fabbricante, arriverà nelle immediate vicinanze della cabina e dovrà essere scaricato per introdurlo nel locale.

Non disponendo di mezzi fissi di sollevamento o di gru a ponte, sarà necessario ricorrere ad un treppiede costituito da tre robusti tubi d'acciaio, uniti in alto da un bullone, portante un gancio adatto a sopportare un paranco.

L'altezza del treppiede e sempre notevole, non meno di metri 3,50, e la manovra per riuscire a metterlo in piedi è meno semplice di quello che si può immaginare.

Pensiamo valga la pena di descrivere le varie fasi in modo che il lettore, meno provveduto in questo campo, possa disporre le cose razionalmente.

La squadra che manovra il treppiede deve essere composta di quattro robusti manovali dei quali il più esperto deve assumere il ruolo di coordinatore.

L'attrezzo, posato per terra, deve essere alzato da due operatori dalla parte del gancio, mentre gli altri due devono mantenere fermi i piedi terminali, onde non scivolino sul terreno.

I due operatori che alzano l'attrezzo, agendo in modo sincrono, devono portarlo in posizione verticale; arrivati a questo punto i tre tubi costituenti il treppiede devono essere impugnati ciascuno da un operatore che, al comando del quarto che dirige l'operazione, dovrà spostarsi lentamente in modo da far combaciare i piedi con i vertici di un triangolo equilatero.

Durante lo spostamento l'operatore che comanda l'operazione dovrà osservare che la testa dell'attrezzo sia sempre bene al centro fra i tre che si spostano.

Sotto ogni piede, che avrà raggiunta la sede definitiva (fig. 56) deve essere posta una tavola di 4 o 5 cm di spessore, nella quale in precedenza, sarà stato scavato un rozzo incavo adatto a ricevere la base dell'attrezzo.

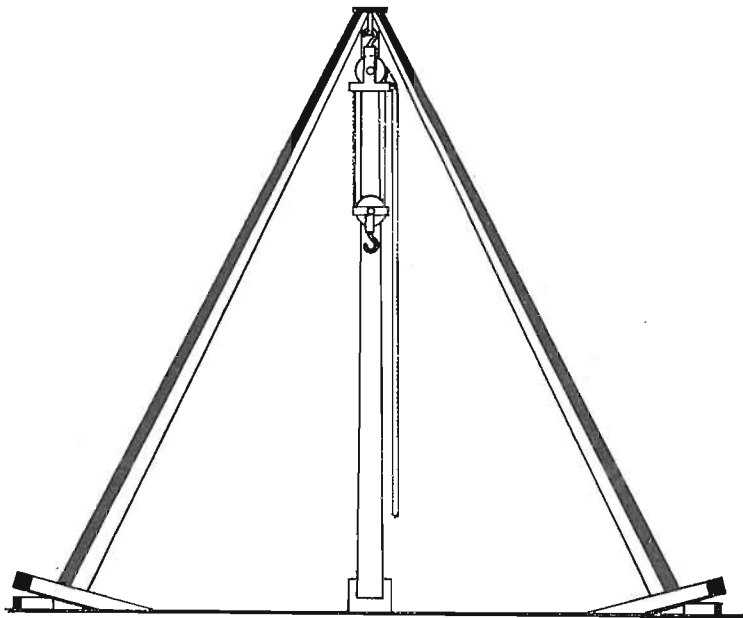



Fig. 56 – Vista di un treppiede pronto per il sollevamento del trasformatore.

Nella parte esterna, e al di sotto di questa, è necessario introdurre uno spessore costituito generalmente da un pezzo di tavola, in modo da dare una certa inclinazione verso l'interno al primo pezzo messo in opera. Questo accorgimento impedirà, sotto lo sforzo, qualsiasi azione di scivolamento dei piedi dell'attrezzo.

Non è prudente appoggiare direttamente i piedi sul terreno, specialmente quando non è selciato, poichè, essendo la superficie d'appoggio relativamente scarsa, è possibile che al sollevamento del peso uno dei piedi penetri nel terreno, sbilanciando e facendo cadere l'apparecchio nel momento cruciale.

L'autocarro sul quale è caricato il trasformatore deve essere introdotto sotto il treppiede dopo averne asportato le sponde laterali, o se questo non fosse possibile, dopo averle completamente ribaltate, onde impedire che la reazione delle balestre dell'autocarro, al momento del

sollevamento del trasformatore, facendo premere le sponde sui montanti del treppiede, ne determini l'apertura facendolo cadere (fig. 57).

Agganciato il paranco nella apposita sede posta al vertice del treppiede, mediante una fune metallica chiusa ad anello e ganci introdotti nei golfari, si agisce in modo da sollevare il trasformatore di pochi centimetri dal piano portante dell'autocarro, scuotendolo poi abbastanza forte onde assicurarsi della assoluta stabilità dell'attrezzo.

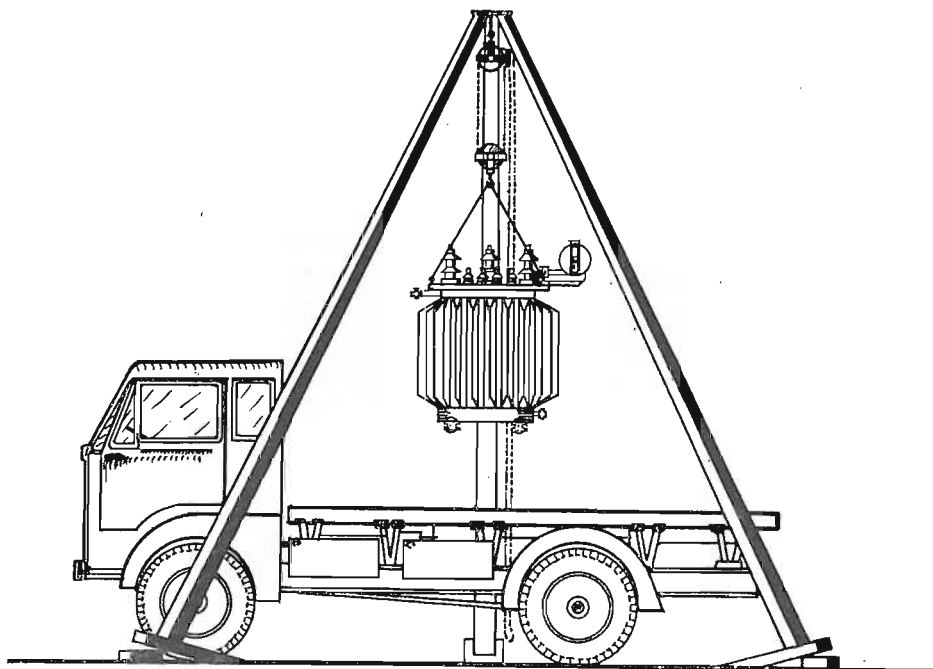



Fig. 57 – Introduzione dell'autocarro sotto il treppiede.

Fatto questo si continua il sollevamento in modo da liberare definitivamente l'autocarro e farlo uscire dall'area occupata dal treppiede.

Sarà opportuno ricordare che gli autocarri, a vuoto, hanno generalmente, la parte posteriore più alta di una diecina di centimetri della parte anteriore, e che quindi la macchina deve essere sollevata di quel tanto che basti a non urtare sul piano portante, quando l'autocarro esce dall'area di manovra.

Prima di far discendere la macchina è necessario predisporre un piano di tavole a livello del pavimento del locale, e orientare le ruote

del trasformatore nel senso del moto che assumerà la macchina per l'introduzione.

Qualora il trasformatore fosse isolato in aria, e quindi avesse le slitte (fig. 58) al posto delle ruote, occorre predisporre sulle tavole due rulli di scorrimento costituiti da due brevi tratti di robusto tubo di acciaio.

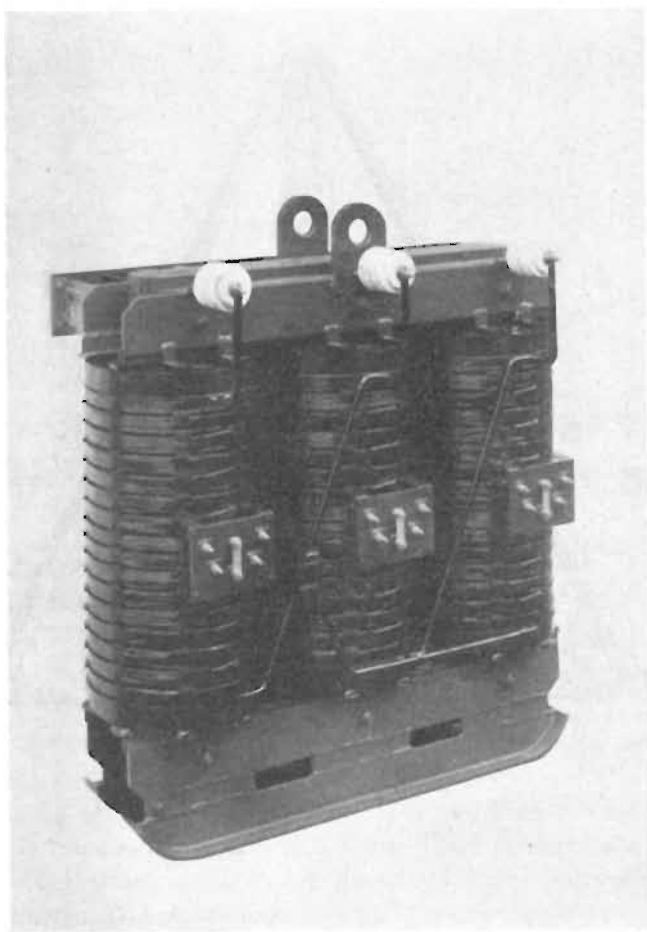



Fig. 58 – Trasformatore isolato in aria.

Introdotto il trasformatore nella cabina, e posto nella sede definitiva, l'operatore dovrà controllare il parallelismo della macchina con la parete e la necessaria distanza dal muro.

Tale distanza, il cui valore è completamente indifferente per i trasformatori isolati in olio, assume grande importanza per quelli isolati in aria, nei quali i conduttori dell'avvolgimento di media tensione sono generalmente posti all'esterno e il cui isolamento si riferisce esclusivamente alla differenza di tensione fra spire contigue (volt-spira).

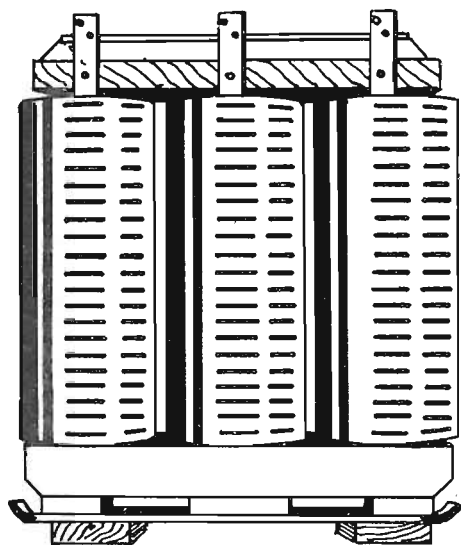



Fig. 59 – Trasformatore isolato in aria con travetti di sollevamento.

Questi conduttori devono essere considerati alla stessa stregua dei conduttori nudi, e la loro distanza minima dal muro non deve essere, in nessun caso, inferiore a quella ritenuta necessaria dal progettista fra la massa e i conduttori a media tensione.

Per i trasformatori isolati in aria sarà necessario introdurre sotto le slitte due robusti pezzi di tavola, aventi uno spessore minimo di quattro centimetri (fig. 59).

Questo accorgimento farà risparmiare molta fatica nel caso si dovesse rimuovere la macchina e faciliterà, non solo l'asportazione della polvere durante la pulizia della cabina, ma renderà possibile un maggiore afflusso dell'aria di rafreddamento.

Per i trasformatori isolati in olio sarà necessario, una volta posti nella posizione definitiva, agire sui bulloni di fissaggio, predisposti dal

costruttore sui portanti delle ruote, in modo che il peso della macchina si suddivida fra le ruote e i bulloni.

Quando nel trasformatore è previsto il relè ad espansione di gas, sarà buona regola introdurre sotto le ruote, poste dalla parte del conservatore, uno spessore di un centimetro, in modo da favorire l'afflusso di eventuali gas di decomposizione verso l'apparecchio.

Locale posto nello scantinato e non accessibile per mezzo della botola per calo trasformatori

Quando il locale destinato alla cabina di trasformazione non è a piano terra e non esiste la possibilità di costruire una botola per calo trasformatori, si presenta il problema di far discendere la macchina lungo una o più rampe di scale.

L'operazione è tutt'altro che facile e in ogni caso richiede l'opera di specialisti, in quanto le condizioni e le necessità che si presentano devono essere vagliate volta per volta e sono difficilmente riportabili al caso generale.

Pensiamo perciò sia utile fornire alcune indicazioni, valevoli in ogni caso, perchè si riferiscono ad accorgimenti sempre possibili per facilitare il lavoro.

Trattandosi di trasformatori in olio, onde diminuire il peso della macchina, durante il trasporto dal piano terra alla cantina si può togliere l'olio.

Questa operazione presenta però inconvenienti notevoli, perchè è sempre possibile che l'olio e la macchina assorbano l'umidità dell'aria, diminuendo così il livello d'isolamento raggiunto dopo il trattamento del trasformatore e del liquido isolante.

Sarà quindi opportuno che la decisione di togliere l'olio venga presa a ragione veduta e solo quando non se ne può fare assolutamente a meno.

In questo caso è consigliabile che l'operazione di svuotamento venga eseguita dal costruttore, a macchina calda, qualche momento prima che il trasformatore venga caricato sull'autocarro per il trasporto.

L'olio dovrà essere immesso entro fusti essiccati, da chiudere ermeticamente, e la macchina, durante il trasporto, dovrà essere avvolta in un copertone impermeabile che la tenga, per quanto possibile, separata dall'ambiente esterno.

Non appena il trasformatore ha raggiunto la sede definitiva, l'olio deve essere rimesso nella macchina, facendo uso di una pompa a mano con il pescante immerso nei fusti e il tubo di mandata avvitato al rubinetto posto nella parte superiore.

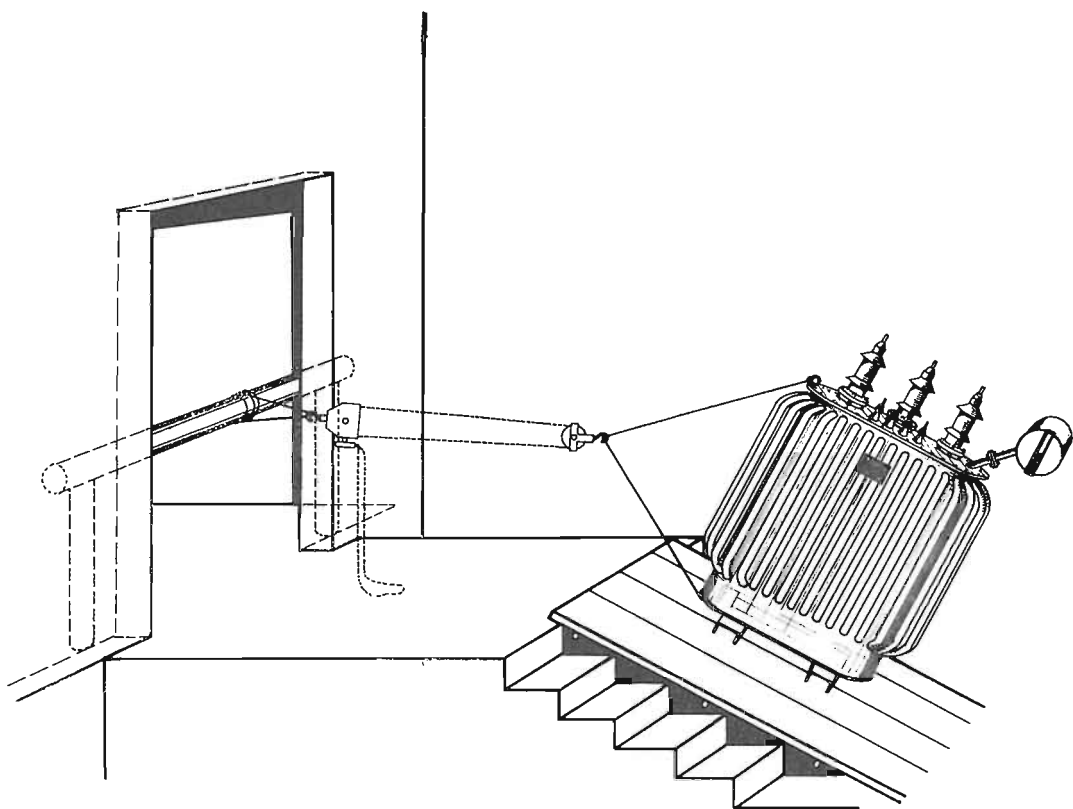



Fig. 60 – Modalità di attacco delle corde e degli accorgimenti necessari per la discesa di un trasformatore su una scala.

Con questo accorgimento l'assorbimento di umidità da parte dell'olio sarà minimo, in quanto il liquido caldo verrà in contatto con l'aria in modo molto modesto.

L'uso di secchi per trasferire l'olio dai fusti alla macchina deve essere assolutamente evitato.

Sulla scala per la quale il trasformatore deve transitare, devono essere fissate due robuste tavole atte a formare un piano inclinato sul quale dovrà scorrere la macchina. Onde diminuire lo sforzo di trazione esercitato dal trasformatore è opportuno aumentare l'attrito sulle tavole togliendo le ruote e facendo aderire ad esse il labbro dei ferri di sostegno (fig. 60).

Quando la scala è molto ripida si può ricorrere anche allo spargimento di sabbia bagnata sulle tavole, che contribuirà in modo notevole ad aumentare l'azione antiscivolante.

In ogni modo il trasformatore deve essere trattenuto per mezzo di corde rese solidali con uno dei golfari e con il ponte inferiore di sostegno della macchina, facenti capo ad un paranco fermato ad un trave bloccato da muri, o a un dispositivo di controspinta appositamente costruito (fig. 60).

Quando la scala si sviluppa su due rampe poste a 90°, prima dell'introduzione del trasformatore è necessario verificare che nel pianerottolo vi sia un'altezza sufficiente, tra pavimento e soffitto, per poter sollevare la macchina e farla girare.

L'altezza utile, non deve essere inferiore alla somma dei seguenti valori:

— altezza del trasformatore misurata ai golfari;
— lunghezza dei ganci e delle funi d'unione con il paranco;
— ingombro del paranco chiuso (da gancio a gancio);
— distanza del gancio superiore del paranco dal soffitto.

Nel caso che la scala non sia costruita fra due muri portanti, e che quindi si trovi a sbalzo, è prudente prevedere un'armatura effettuata con travi e puntelli da immettere sotto la parte libera in modo da assicurarne la più assoluta stabilità (fig. 61).

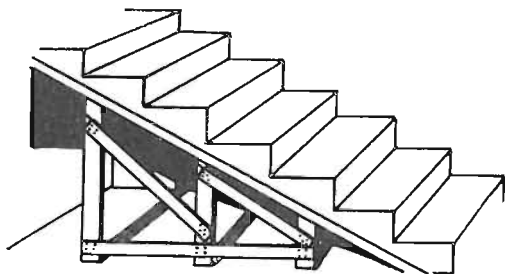



Fig. 61 – Un tipo di armatura in legno per sostegno di una scala a sbalzo.

Quando si tratta di trasportare nel modo descritto, trasformatori in aria, il lavoro diviene molto più delicato, in quanto la minima scal-

fittura negli isolanti degli avvolgimenti ne comprometterebbe il funzionamento.

Naturalmente il trasformatore in aria non può essere diminuito di peso e, a parità di potenza, ha un peso maggiore dei trasformatori in olio.

Occorre inoltre ricordare che, mentre un trasformatore isolato in olio, specialmente costruito per il funzionamento all'esterno, può essere immesso nel locale quando lo si ritiene più opportuno, i trasformatori isolati in aria devono essere portati nella cabina poche ore prima della messa in servizio, non sopportando, questo tipo di trasformatore, per le caratteristiche costruttive, un soggiorno prolungato in locali umidi, anche se l'umidità è dovuta a lavori di muratura o sbiancatura recente.

Trasporto in piano di trasformatori isolati in aria

Mentre per i trasformatori aventi l'isolamento in olio il trasporto in piano non presenta difficoltà particolari, in quanto è facilitato dai rulli di scorrimento orientabili nel senso del moto, che ogni costruttore prevede nella macchina, per il trasformatore in aria, la cui base è formata da una slitta costituita da robusti ferri a C posti di lato, è necessario ricorrere ad accorgimenti particolari (fig. 62).

In genere le testate dei due ferri costituenti la slitta sono ripiegate leggermente verso l'alto alle due estremità, in modo da favorire l'introduzione di leve per il sollevamento della macchina, e per trasportare il trasformatore è necessario introdurre al di sotto della slitta, quasi in posizione centrale un robusto tubo d'acciaio avente una lunghezza maggiore di circa 40 cm dell'ingombro laterale della slitta.

Fig. 62.
Metodo di trasporto di un trasformatore in aria su percorso piano.

Per far ciò è necessario alzare la macchina da una parte, mediante l'azione di due leve appoggiate a un travetto di legno posto a circa 10 cm dalla testata della slitta e la cui altezza non deve essere inferiore al diametro esterno del tubo.

L'azione di sollevamento deve essere eseguita in modo sincrono da due operatori, mentre altri due, uno ogni lato della macchina, ne assicurano la stabilità, facendo forza sul nucleo magnetico con le mani, in modo contrapposto.

Appena la macchina è sollevata di quel tanto che necessita, si introduce al di sotto della slitta il rullo, spingendolo per quanto è possibile verso il centro.

Tolte le leve e facendo contrappeso sull'estremità sollevata, si porterà il trasformatore in bilico introducendo sotto la slitta un altro rullo, in modo che la macchina resti in piano.

Spingendo adesso il trasformatore questi percorrerà un tratto di pavimento, senza sforzo, fin quando il rullo posteriore uscirà dalla parte posteriore e il trasformatore si ribalterà davanti, in quanto, anche l'altro rullo avrà oltrepassato la mezzeria della macchina.

Ottenuto ciò si rialzerà il trasformatore introducendo il rullo libero nella parte anteriore, e si continuerà l'operazione fino quando si sia raggiunto il luogo predisposto per la posa definitiva.

Quando il percorso non è diritto gli operatori avranno cura d'introdurre il rullo, angolato verso il senso della curva che la macchina deve compiere, e questa seguirà facilmente l'andamento del rullo.

Si ricorda che l'azione di spinta del trasformatore deve essere esercitata solo sul nucleo magnetico e sulle testate della slitta, in quanto, sia gli isolatori che gli avvolgimenti, potrebbero rimanere danneggiati dalle sollecitazioni meccaniche necessarie per lo spostamento della macchina.

Opere e accorgimenti necessari per il raffreddamento del trasformatore

Immettere in un locale uno o più trasformatori funzionanti a pieno carico significa introdurre nel locale una stufa elettrica che assorbe una potenza il cui valore è dato dalla somma delle perdite delle singole macchine, è quindi evidente che qualora l'ambiente non potesse essere raffreddato i limiti della temperatura che si raggiungerebbero, oltrepasserebbero senz'altro quelli massimi ammessi dalle Norme CEI, e sui quali sono basate tutte le prove di collaudo tendenti a stabilire il valore della corrente nominale massima che il trasformatore può erogare.

Questo valore infatti è limitato dalla sovratemperatura che gli elementi costituenti la macchina possono raggiungere, supponendo che

l'ambiente non superi i 40 °C di temperatura, limite oltre al quale la intensità di corrente erogata dal trasformatore, in servizio continuo, deve essere ridotta, onde la temperatura massima raggiunta dagli avvolgimenti non determini la carbonizzazione degli isolanti e di conseguenza produca fenomeni di invecchiamento sufficienti a impedirne il funzionamento entro breve termine.

Al contrario, qualora si riesca a creare, nell'interno del locale adibito a cabina, condizioni di raffreddamento tali da rimanere costantemente al di sotto della massima temperatura ambiente ammessa dalle Norme CEI, è possibile, come vedremo, sovraccaricare la macchina senza produrre in essa danni di sorta.

Il problema del raffreddamento del locale della cabina, qualora non s'intenda provvedere a questa necessità con mezzi meccanici, deve essere studiato a fondo dal progettista, onde non creare, durante l'esercizio, situazioni che potrebbero divenire pericolose per l'integrità delle macchine installate e incidere fortemente sulla continuità del servizio.

In genere la ventilazione del locale si ottiene aprendo nella parte prospiciente il pavimento, e possibilmente immediatamente dietro ai trasformatori, finestre munite di grigliati per favorire l'afflusso dell'aria esterna, mentre l'aria riscaldata dal calore prodotto dai trasformatori, e divenuta più leggera per il conseguente dilatamento delle molecole, sfugge da aperture praticate nella parte alta del locale, attivando un continuo ricambio che tende a mantenere la temperatura del locale entro limiti accettabili (fig. 63).

Quando il locale della cabina è posto nello scantinato, sarà sufficiente costruire la porta d'accesso con la parte inferiore grigliata, mentre nella porta che immette nella botola per calo trasformatore la grigliatura viene praticata nella parte alta, provvedendo nel contempo a forare i manufatti di copertura della botola (fig. 64).

In genere sia l'area della griglia di aspirazione che di quella di espirazione dovrebbero equivalersi.

Quando la cabina dovesse essere costituita da un pozzo scavato nel terreno, senza possibilità di attingere aria dal basso (fig. 65) la soluzione del problema relativo al raffreddamento del locale può essere trovata in due maniere diverse ugualmente efficienti.

La prima (fig. 66) prevede un camino grigliato che dal piano terra penetra nella parte bassa del locale, mentre sulla parte alta della porta, che immette nella botola per calo trasformatori, si ricava una finestra per l'uscita dell'aria calda.

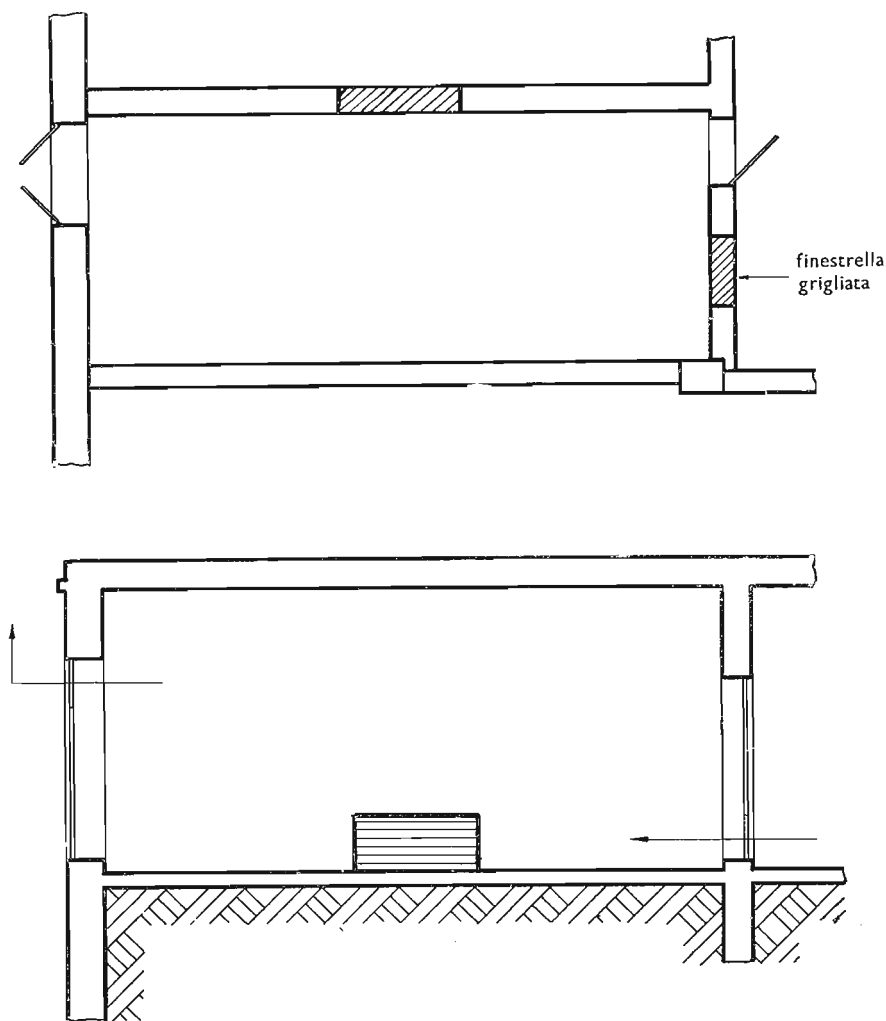



Fig. 63 – Aperture d'aerazione nelle cabine di trasformazione.

La seconda (fig. 67) prevede la costruzione di una presa d'aria sulla parte inferiore della porta, mentre sul soffitto della cabina, preferibilmente nella posizione centrale, un passaggio grigliato immette in un camino vero e proprio.

L'areazione sarà tanto migliore quanto maggiore sarà la differenza d'altezza dei due condotti, misurata alle imboccature d'entrata e d'uscita.

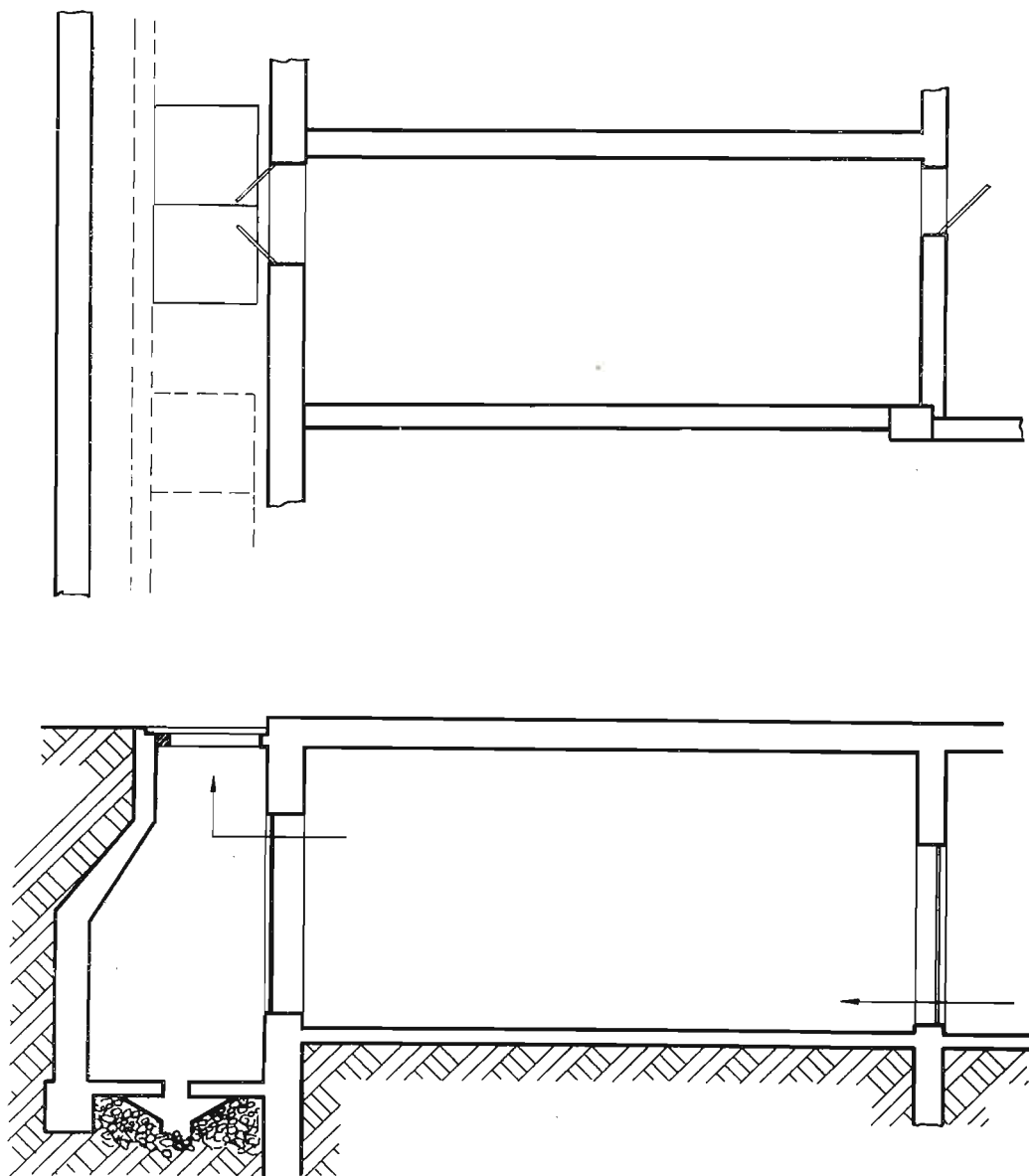



Fig. 64 – Finestre d'aerazione aperte sulle due porte d'accesso.

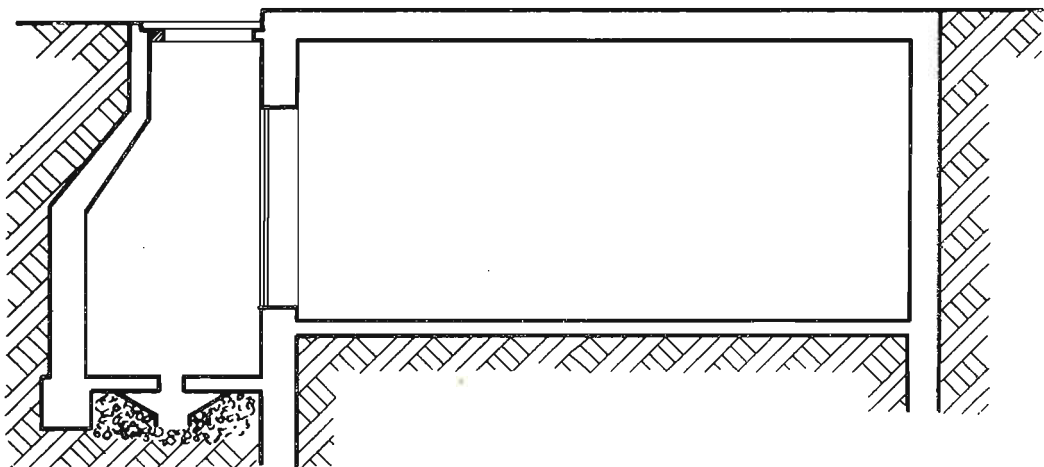



Fig. 65 – Locale cabina ricavato in un terrapieno.

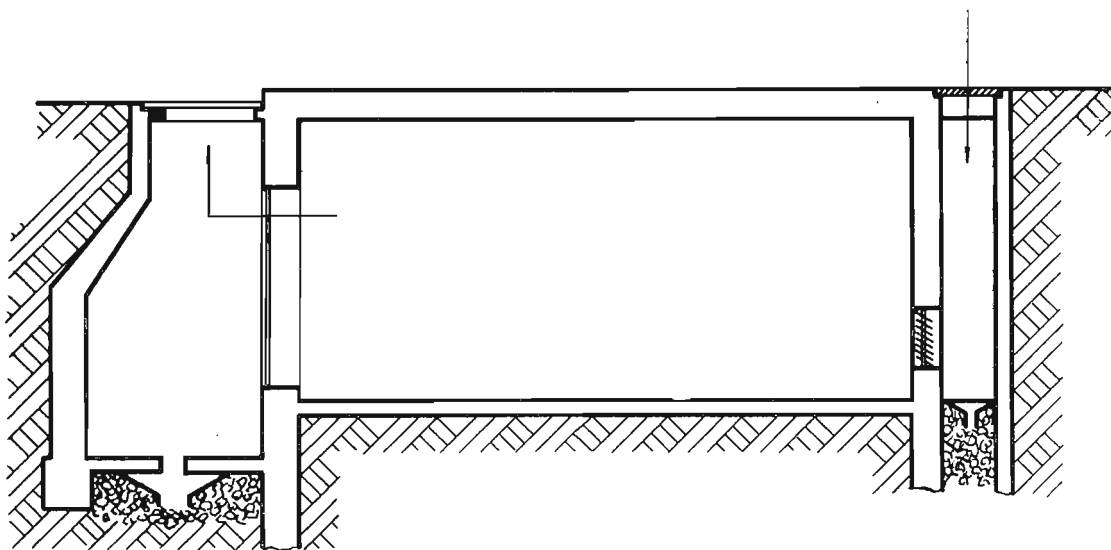



Fig. 66 – Cunicolo d'aerazione per cabina ricavata in un terrapieno.

Esistono formule teoriche per stabilire le sezioni minime utili per il passaggio dell'aria di raffreddamento, in pratica i progettisti possono avvalersi dei valori riportati nelllo specchietto a pag. 164 che fornisce l'area totale delle aperture, espressa in metri quadrati, in funzione della

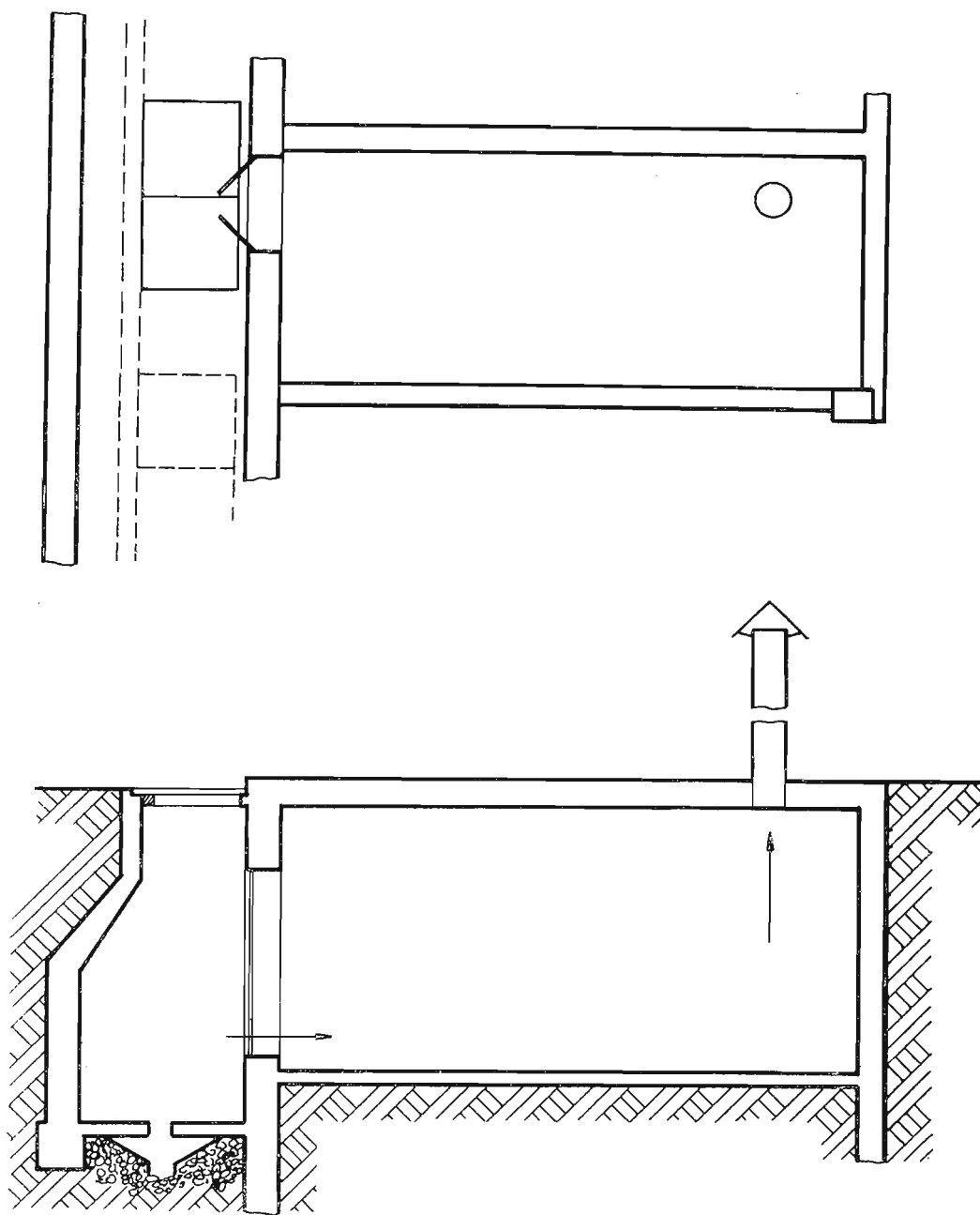



Fig. 67 – Camino d'aerazione per cabina ricavata in un terrapieno.

potenza del trasformatore e della differenza d'altezza delle bocche di aspirazione e di uscita, misurata alla mezzeria delle bocche stesse.

Qualora per condizioni particolari d'impianto si dovesse ricorrere alla ventilazione meccanica, il progettista deve ricordare che, all'incirca, occorre ricambiare due metri cubi d'aria al minuto per chilowatt di perdite.

Differenza di altezza fra le bocche di ventilazione m	Potenza dei trasformatori kVA										
	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	5000	10 000
3	0,35	0,44	0,51	0,62	0,69	0,82	1,01	1,24	1,53	—	—
4	0,31	0,38	0,44	0,54	0,60	0,71	0,87	1,08	1,32	—	—
5	0,28	0,34	0,40	0,48	0,54	0,63	0,78	0,97	1,18	2,55	—
6	—	—	0,36	0,44	0,49	0,58	0,71	0,88	1,08	2,30	—
7	—	—	0,34	0,41	0,45	0,53	0,66	0,81	1,00	2,15	3,55
8	—	—	—	0,39	0,42	0,50	0,62	0,76	0,94	2,00	3,33
9	—	—	—	0,36	0,40	0,47	0,58	0,72	0,88	0,10	3,14

Questa informazione sarà sufficiente per determinare la potenza del motore necessario all'aspirazione dell'aria di ventilazione.

Il metodo della ventilazione meccanica si applica in special modo quando l'aria dei locali, posti nelle immediate vicinanze della cabina, contiene sostanze corrosive, costruendo una tubazione, per l'aspiratore, che abbia la bocca di presa al di fuori dell'area inquinata.

Attuando la ventilazione forzata si crea, oltre a tutto, una certa sovrappressione nel locale della cabina, sufficiente a impedire l'ingresso di aria contenente sostanze nocive, contribuendo così a mantenere integre le apparecchiature in essa contenute.

Nelle stazioni di trasformazione, quando i trasformatori sono posti entro celle ventilate, è possibile disporre bocche di soffiaggio poste in

corrispondenza delle alette del trasformatore (fig. 68). L'azionamento del ventilatore predisposto è generalmente comandato da un termometro a immagine termica installato nella macchina, e rende possibile sovraccaricare il trasformatore, per oltrepassare, senza danno, punte di carico transitorie o comunque di durata limitata, anche ricorrenti una o due volte nelle 24 ore.

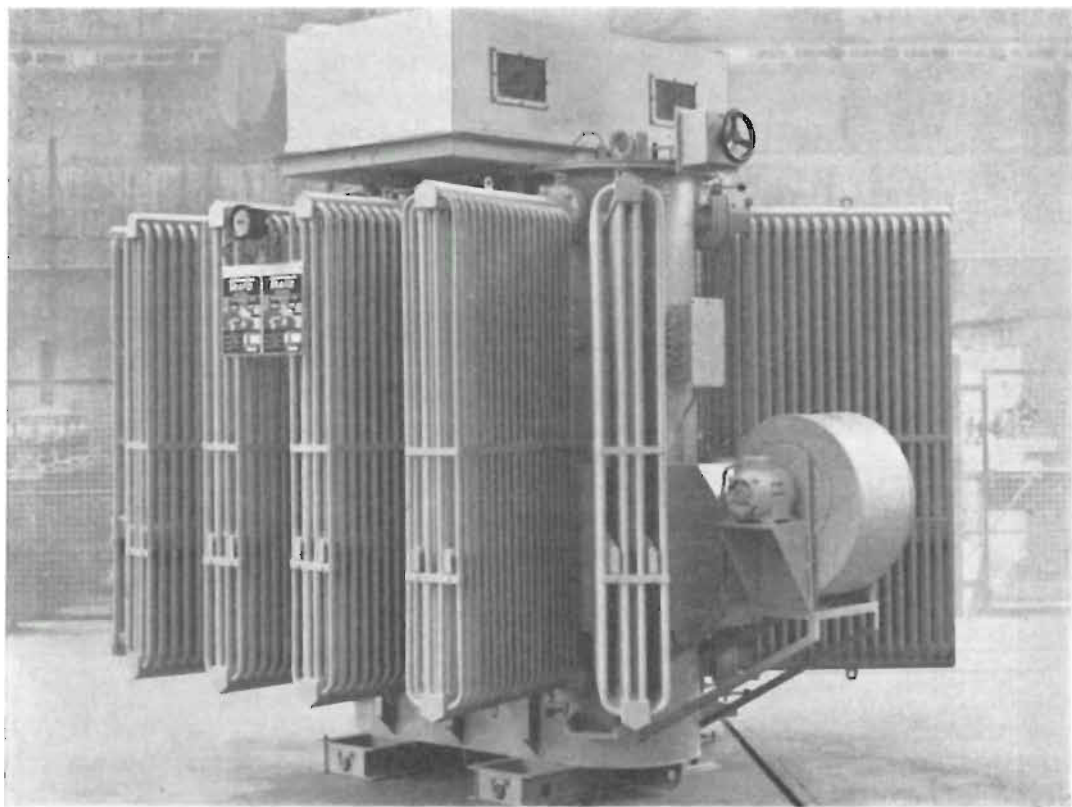



Fig. 68 -- Trasformatore in olio con dispositivo di ventilazione meccanica (TRAFO).

Come il lettore avrà potuto notare, ogni volta che si è parlato di aperture da costruire nella cabina è ricorso sempre il termine di aperture grigliate. Infatti è necessario che nella cabina, qualunque apertura porti una grigliatura sufficiente a impedire l'ingresso nel locale di animali che potrebbero provocare seri danni alle apparecchiature ed essere la causa di numerosi disservizi.

Quando le aperture dovessero essere costruite in fregio ad una pubblica via, o comunque entro cortili accessibili a bambini, dovranno essere protette da tapparelle a persiana costruite in modo da impedire, in via assoluta, l'accesso di materiali metallici, come fili di ferro ecc., che possano portare il bambino a contatto con conduttori in tensione.

Quando non si ritenga opportuno ricorrere a tapparelle, lo scopo può essere raggiunto con una doppia parete di lamiera, sulla quale i fori necessari per l'entrata dell'aria non siano corrispondenti, e i cui centri quindi vengano sfalsati, in modo da non offrire una facile via per l'introduzione di fili metallici. Fra le due pareti deve essere interposta una distanza sufficiente alla libera circolazione dell'aria.

Opere e accorgimenti per la raccolta e l'eventuale spegnimento dell'olio contenuto nei trasformatori

I trasformatori di potenza isolati in olio presentano, per lo stesso criterio costruttivo, un certo grado di pericolo, costituito dalla possibilità che l'olio isolante, contenuto nelle macchine, possa incendiarsi.

Le cause per le quali è possibile pervenire alle condizioni necessarie per il prodursi dell'incendio sono le seguenti:

a) forte sovraccarico prolungato;

b) deficienze gravi d'isolamento fra i lamierini del nucleo magnetico;

c) deficienze d'isolamento fra le spire degli avvolgimenti;

d) sovratensioni d'origine atmosferica, atte a produrre, all'interno della macchina, adescamenti d'arco e corti circuiti per sfasciamento degli avvolgimenti;

e) fulminazioni dirette.

È evidente che le cause elencate potranno arrivare alla determinazione delle condizioni di pericolo, solo nel caso che il progettista dell'impianto abbia omesso le protezioni atte ad un intervento rapido, o quando, per qualsiasi causa, le protezioni non dovessero funzionare.

Infatti, mediante la protezione da sovraccarico e da corto circuito, poste rispettivamente a valle e a monte del trasformatore, le voci riportate nei punti *a*) e *d*) possono considerarsi eliminate e, in particolare per la voce *d*) la corretta posa in opera degli scaricatori di sovratensioni, calcolati in modo che il livello di protezione sia nettamente inferiore al

livello d'isolamento, dovrebbero non solo impedire l'incendio, ma, soprattutto, ovviare ai guasti alla macchina derivati da questa causa.

Per le voci *b*) e *c*), e in genere per tutte le cause interne di guasto nei trasformatori, l'apposizione sulla macchina del relè ad espansione di gas, dovendo forzatamente prodursi, prima dell'incendio, una notevole gassificazione dell'olio, impedisce, pressochè in via assoluta, mediante il tempestivo distacco della macchina dell'alimentazione, il determinarsi delle condizioni di pericolo.

Nei riguardi delle fulminazioni dirette, possibili sulle macchine posate in cabine all'aperto, la protezione differenziale, o, più economicamente i relè spinterometrici, provvedendo al distacco immediato della macchina, dovrebbero diminuire fortemente le probabilità d'incendio.

Evidentemente le protezioni descritte possono non esistere, o non funzionare e quindi, nella formulazione del decreto-legge per la prevenzione degli infortuni sul lavoro (n. 547 del 27-4-'55) il legislatore ha voluto indicare un ulteriore mezzo di protezione che non si riferisce alla macchina, ma alle conseguenze che potrebbero derivare da un'eventuale uscita dalla carcassa dell'olio incendiato.

Questo mezzo, il cui funzionamento non dipende nè da apparati meccanici, nè da apparati elettrici, è il pozzetto per la raccolta dell'olio dei trasformatori che la legge impone sia costruito quando il quantitativo d'olio contenuto nella macchina superi i 500 kg.

L'articolo, facente parte del decreto-legge summenzionato, dice testualmente:

Art. 300 – *I trasformatori elettrici in olio contenenti una quantità d'olio superiore a 500 chilogrammi, quando non siano installati in cabine isolate, devono essere provvisti di pozzetti o vasche o di altre opere atte a impedire il dilagare dell'olio infiammato all'esterno delle cabine o dei recinti.*

Com'è possibile notare l'articolo non si riferisce a un limite di potenza dei trasformatori installati, ma considera soltanto il quantitativo d'olio contenuto nella macchina o nelle macchine.

Il pozzetto per la raccolta dell'olio dovrà quindi essere costruito, non solo quando nella cabina venga posata una macchina che contenga il quantitativo d'olio indicato dalla legge; ma anche quando nella cabina vengano predisposti gli spazi atti ad accogliere più macchine, anche se, in un primo tempo, l'esercizio sia previsto con un trasformatore di potenza tale da non contenere i 500 kg d'olio.

La determinazione del quantitativo dell'olio contenuto in un trasformatore può essere rilevata dalla tabella 45, nella quale sono riportati, a puro titolo informativo, il peso dell'olio in funzione della potenza nominale.

Come si può rilevare, considerando un'unica macchina, l'obbligatorietà della costruzione del pozzetto di raccolta inizia dalla potenza nominale di 315 kVA, per trasformatori adatti alle medie tensioni (fino a 15 kV).

I dati riportati nella tabella devono essere considerati come puramente informativi, in quanto, malgrado tutti i capitolati e i criteri di unificazione, il trasformatore rimane sempre una macchina per la quale il criterio di progettazione è quasi sempre economico e riflette le condizioni di mercato riferite agli elementi necessari alla costruzione, per cui, nel caso che il costo dell'olio si portasse a limiti inferiori di quelli secondo i quali la tabella è stata compilata, si potrebbero avere notevoli variazioni nel proporzionamento degli elementi nel senso di una diminuzione sentita dei quantitativi di ferro e di rame e un corrispondente aumento del quantitativo d'olio.

Occorre quindi concludere che, quando la cabina viene prevista per una potenza limite, nel senso indicato dalla legge, la decisione, per la costruzione o meno del pozzetto deve essere presa considerando attentamente i dati forniti dal costruttore della macchina, ed elencati nella conferma d'ordine.

Metodi di costruzione.

I postulati che presiedono, in modo del tutto generale, alla costruzione di un'opera atta alla raccolta dell'olio sono i seguenti:

— capacità sufficiente al contenimento del quantitativo d'olio previsto;

— massima velocità di assorbimento;

— previsione di dispositivi atti a spegnere l'olio incendiato, prima che questo arrivi alla vasca di raccolta.

Senza entrare nel merito delle probabilità che avvenga l'incendio dell'olio e lo scoppio della cassa, probabilità sommamente ridotte, non solo per le protezioni efficienti ormai generalmente previste in questi tipi di impianto, ma soprattutto per l'affinamento della tecnica costruttiva dei trasformatori, esaminiamo le realizzazioni più usate.

Per unità di potenza comprese fra 315 e 400 kVA, si usa, generalmente, un dispositivo prefabbricato, in cemento armato e vibrato, i cui particolari costruttivi sono riportati nella fig. 69.

Questo manufatto si definisce « *ricuperatore di olio a sifone* » e consta di un vaso cilindrico ottenibile in un'unica soluzione, o diviso a metà per facilitarne il trasporto e la posa. All'interno del vaso sono previste due serie di tre occhielli metallici posti a circa 50 cm dal fondo e a 10 cm dall'imbocco, per l'introduzione dei ganci di sopporto durante la discesa del cilindro nella fossa, generalmente attuata con l'ausilio di un paranco fissato a un treppiede.

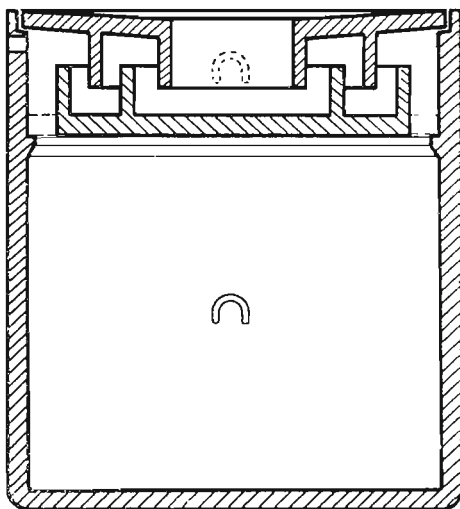



Fig. 69 – Ricuperatore d'olio a sifone prefabbricato.

Nella parte superiore si possono notare due aggetti, uno in corrispondenza del bordo e l'altro a circa 25 cm nell'interno, necessari per l'introduzione e il blocco di due coperchi costruiti in modo da costituire una specie di collo d'oca, per il quale l'olio è costretto a passare, e nel quale avviene l'azione di spegnimento per mancanza dell'ossigeno.

Il coperchio inferiore, dotato di cinque alette che appoggiano sull'aggetto, è di forma rotonda piana, e presenta due setti circolari concentrici aventi un diametro interno di circa 40 cm, per il più piccolo, e di 65 cm per il più grande, e uno spessore di 2,5 cm.

L'altezza dei setti dal piano di fondo è di circa 100 mm; il coperchio deve essere posto in opera in modo da presentare alla vista i due setti liberi.

Il coperchio superiore, anch'esso di forma circolare, costruito in modo da incastrarsi completamente nell'aggetto ricavato sul bordo del contenitore, presenta una convessione verso il centro in modo da ottenere, dal bordo, una differenza di livello di circa 2 cm.

Al centro del coperchio è praticata un'apertura circolare di circa 25 cm di diametro, nella quale trova posto una griglia in piattina e profilati di ferro.

Nella parte inferiore presenta due setti simili a quelli dell'altro coperchio, dei quali uno si trova in corrispondenza con il foro centrale, mentre l'altro è calcolato in modo da trovarsi, quando il coperchio è in opera, nella mezzeria fra i due setti inferiori.

In alto, a sinistra della figura, è prevista una apertura circolare praticata nel contenitore, per l'uscita dell'aria, alla quale va applicato un tubo di ferro uscente, mediante un gomito, dal pavimento in corrispondenza di una parete del locale.

La bocca del tubo deve essere volta verso il basso e protetta con una piccola griglia, in modo da impedire eventuali occlusioni, che infirmerebbero tutto il funzionamento del dispositivo, non potendo l'olio penetrare nel contenitore.

L'azione deflammante del recuperatore è dovuta allo stazionamento di un certo quantitativo d'olio negli spazi esistenti fra i setti costruiti nei coperchi, dai quali l'olio stesso è costretto a tracimare per giungere nel contenitore sottostante.

Prove effettuate con questo dispositivo hanno dato ottimi risultati, in quanto 200 kg d'olio misto con benzina, portato a circa 180 °C di temperatura, incendiato e rovesciato sul pavimento di un locale, al centro del quale era stato posto il recuperatore, sono stati assorbiti dallo stesso in 5 secondi, e ogni traccia d'incendio è scomparsa entro 15 secondi dal rovesciamento del contenitore dell'olio incendiato.

Il recuperatore d'olio descritto può essere posto direttamente sotto la macchina (fig. 70), quando si preveda la posa di un solo trasformatore, o al centro del locale, dando una leggera pendenza al pavimento in modo da convogliare l'olio verso il ricuperatore. La posa non presenta particolari difficoltà, in quanto non si tratta che di effettuare un'opera di scavo, senza necessità di costruire muretti di contenimento.

Il ricuperatore d'olio a sifone può essere usato solo all'interno in quanto, non essendo previsto alcun dispositivo per la fuoriuscita dei liquidi, mentre permette il completo ricupero dell'olio, se posto all'esterno, raccoglierebbe l'acqua piovana con pericolo di non poter assorbire l'olio al momento nel quale si verificano le condizioni di emergenza.

Per questa ragione, ogni tanto, è consigliabile effettuare una visita di controllo per assicurarsi dell'efficienza del mezzo.

Nella fig. 71 abbiamo rappresentato un altro metodo di costruzione del pozzetto di raccolta dell'olio attuato immediatamente sotto la macchina e raccordato con la vasca di raccolta mediante un tubo portante un sifone.

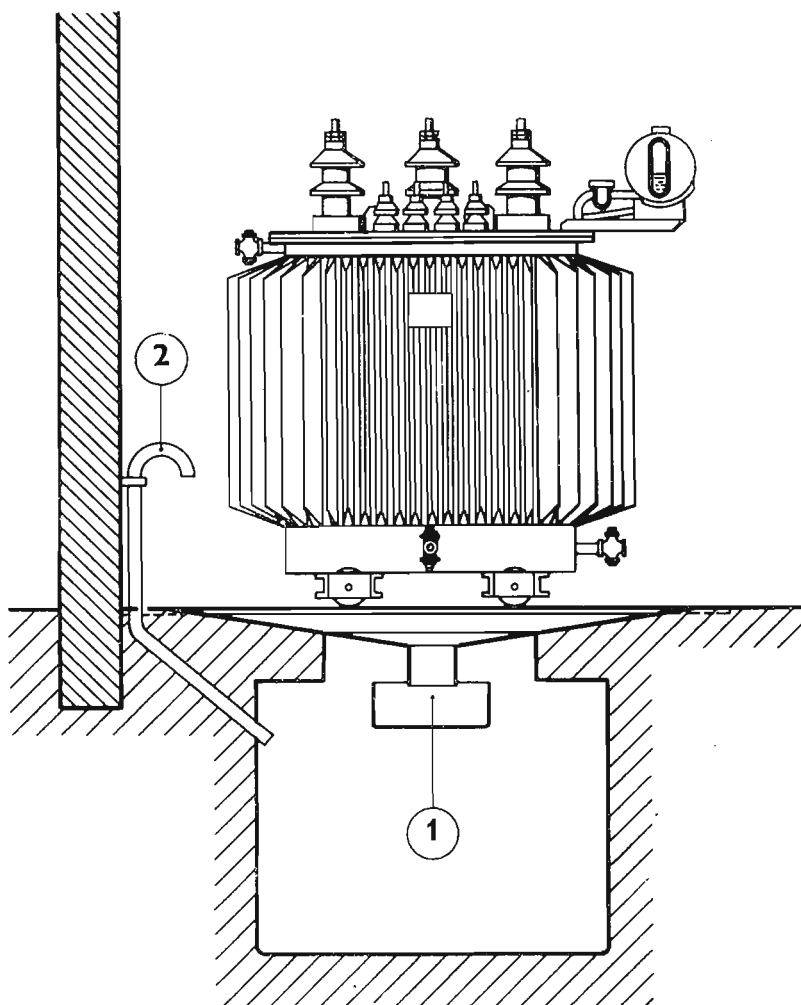



Fig. 70 – Ricuperatore d'olio a sifone costruito sotto la macchina
1) imboccatura sifone; 2) tubo di sfiato.

La vasca, costruita all'interno, deve essere coperta con una griglia o una lamiera forata; sul fondo si prevede, in genere, una piccola fossa che facilita il recupero dell'olio quando venga effettuato mediante una pompa. Con questo metodo è possibile usare una sola vasca di raccolta per più unità, sia facendo confluire in essa i vari tubi, sia unendo i pozzetti con un collettore.

L'onere economico connesso con la realizzazione del metodo esposto è notevolmente maggiore di quello inerente l'uso del ricuperatore prefabbricato.

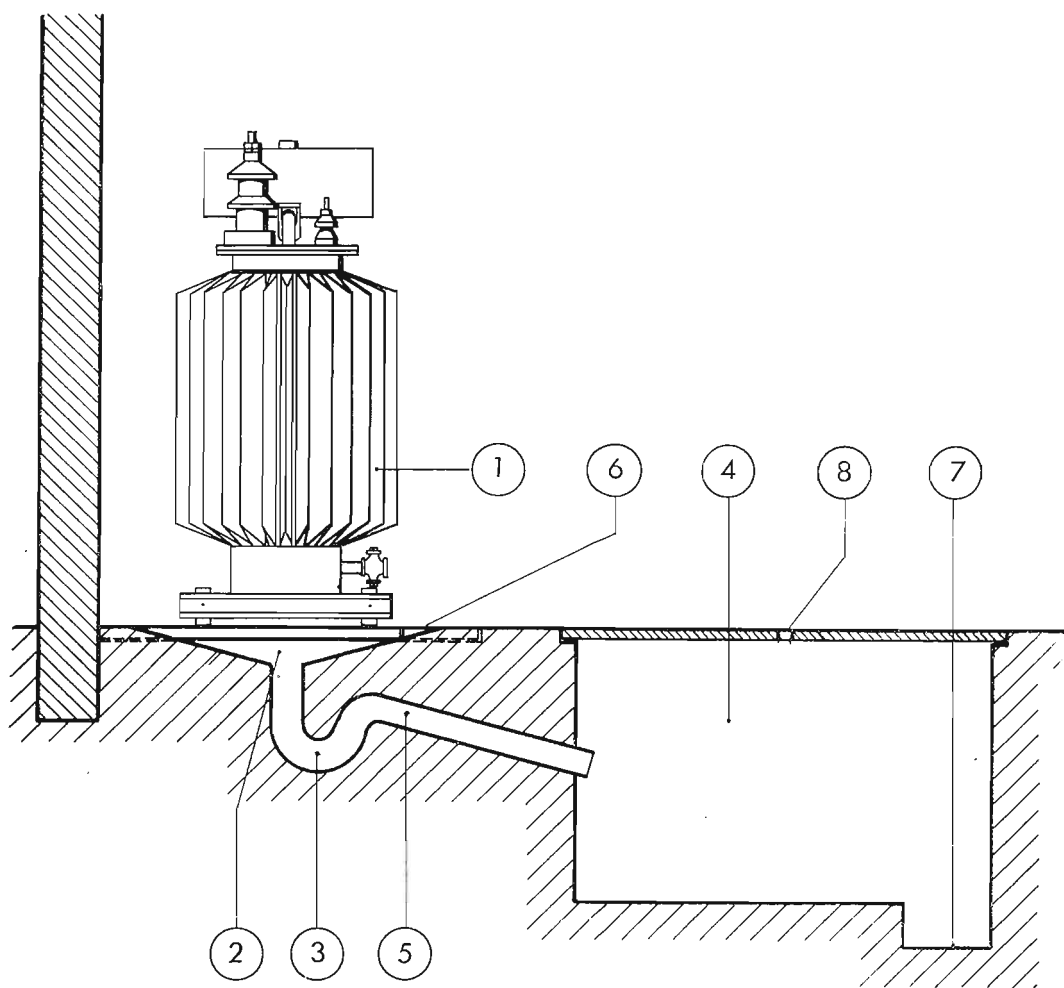



Fig. 71 – Vasca di raccolta dell'olio collocata a distanza dalla macchina e raccordata con tubo o sifone.

1) trasformatore; 2) pozzo di raccolta; 3) sifone; 4) vasca di raccolta; 5) tubo di scarico; 6) guide d'appoggio del trasformatore; 7) pozzetto di pescaggio per il recupero dell'olio; 8) lamiera di chiusura della vasca.

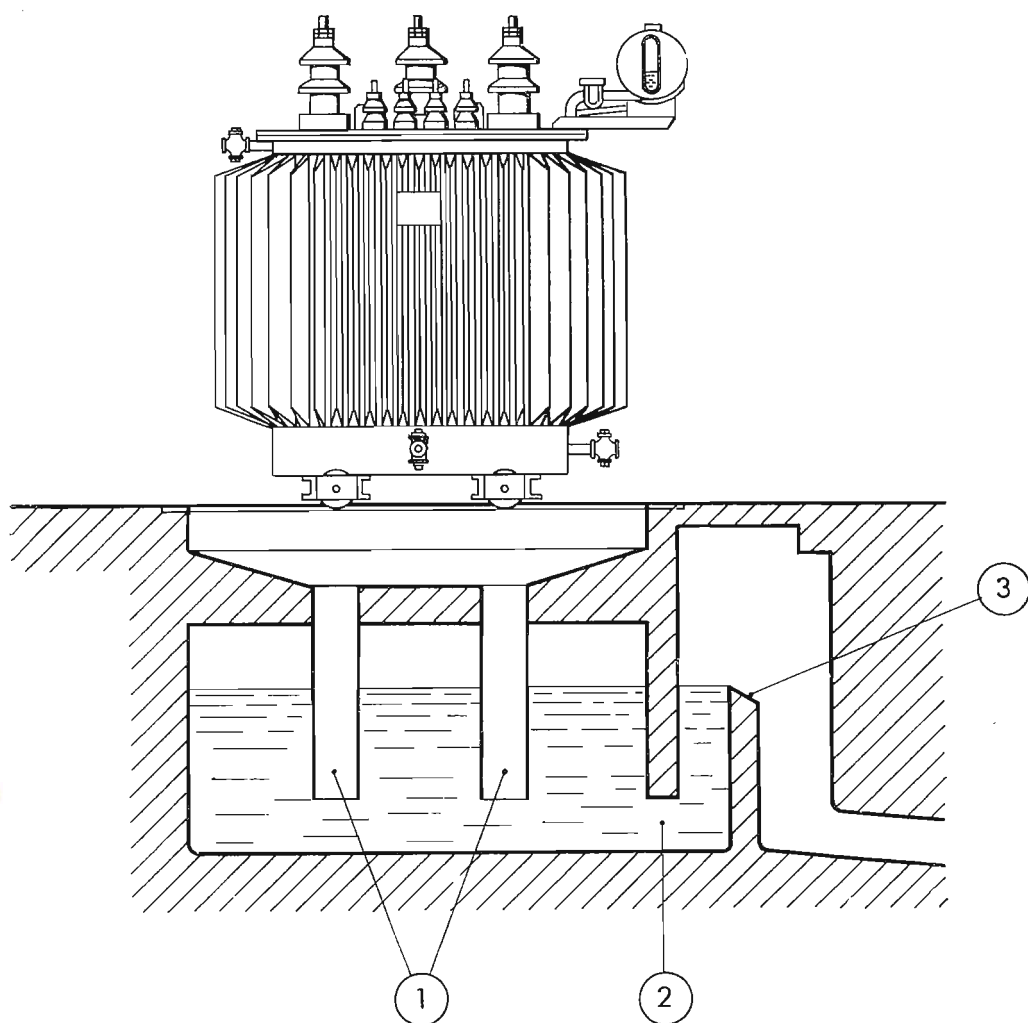



Fig. 72 – Vasca di raccolta di tipo deflammante:

1) tubi d'adduzione dell'olio; 2) pareti del sifone; 3) stramazzo.

Nella fig. 72 è rappresentato un pozzetto deflammante, adatto per unità di media potenza il cui criterio di funzionamento è nettamente diverso da quelli esposti.

Il dispositivo si usa per cabine all'aperto ed è costituito da una vasca posta immediatamente sotto il trasformatore, riempita d'acqua, nella

quale pescano due tubi provenienti dal pozzetto. Attraverso un dispositivo a sifone il liquido viene convogliato su una tubazione di scarico.

L'olio incendiato, proveniente dal trasformatore, viene convogliato dai due tubi sul fondo della vasca e risale verso la superficie per il diverso peso specifico, spegnendosi contemporaneamente per mancanza d'ossigeno.

L'acqua, in un primo tempo, e l'olio in un secondo tempo, tracimano dal sifone e si portano nel tubo di scarico, mentre il livello interno rimane invariato.

Il funzionamento è senz'altro ottimo, ma la costruzione è tutt'altro che facile e abbastanza onerosa.

Per grandi unità di trasformazione presentiamo due soluzioni, una per cabine all'aperto e l'altra per cabine fabbricate all'interno delle quali la seconda, oltre alla raccolta e allo spegnimento dell'olio, prevede anche la ventilazione della macchina, quando questa sia prevista con raffreddamento naturale.

La prima soluzione (fig. 73) si basa sulla costruzione di una vasca, posta fra le due pareti portanti sulle quali sono posate le rotaie d'appoggio della macchina, unita, mediante tubi, a camere laterali, poste immediatamente sotto le alette.

L'azione di spegnimento dell'olio è esplicata da un agglomerato di grossa ghiaia, sopportata da griglie metalliche, poste in corrispondenza del tetto delle vasche.

Lo spessore della ghiaia è di circa 80 cm, e l'azione di spegnimento avviene per l'occlusione dei canali d'aria che si formano fra i sassi, e che, alla mancanza d'ossigeno, aggiungono un'azione di trafilamento simile a quella ottenuta con un labirinto nei contenitori antideflagranti.

Il fondo della vasca principale è inclinato e confluisce in un pozzo perdente, sufficiente alla eliminazione dell'acqua piovana, e che permette, con un pronto intervento, anche l'eventuale recupero di una buona parte dell'olio.

Nella fig. 74 è rappresentato un ricuperatore di olio che, salvo le dimensioni, ripete concettualmente quanto abbiamo detto per i ricuperatori prefabbricati.

Il dispositivo è posto a circa due metri dalla base del trasformatore, e la camera intermedia è sfruttata per l'immissione d'aria di raffreddamento che, come si può rilevare dalla figura, entra da una finestra dotata

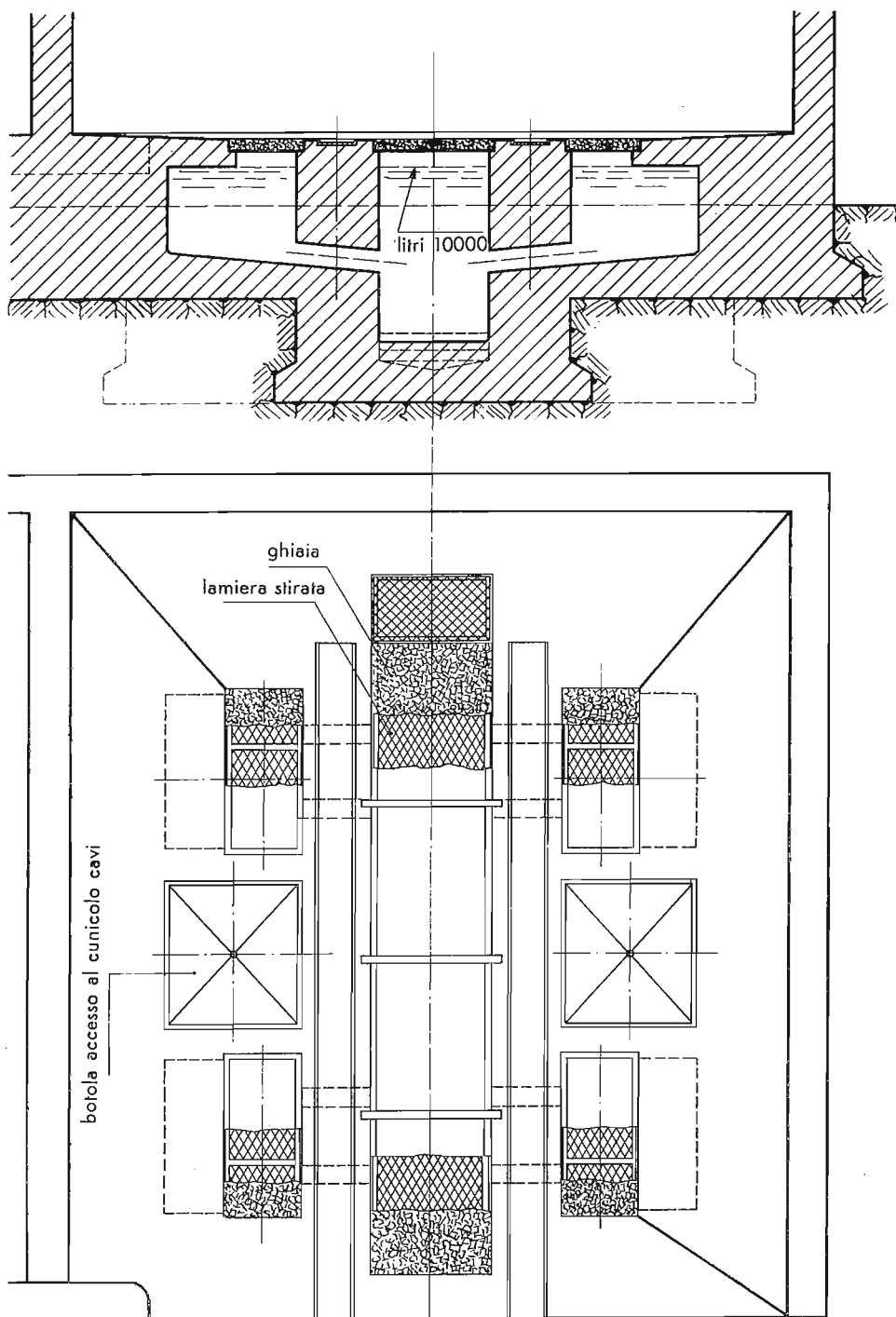



Fig. 73 – Vasca di raccolta per unità di potenza notevole. L'azione di spegnimento è realizzata con ammassi di ghiaia.

di alette mobili, generalmente azionate da un motore che ne effettua la chiusura quando dovesse avvenire l'incendio della macchina, in modo da occludere l'accesso dell'aria che alimenterebbe l'incendio.

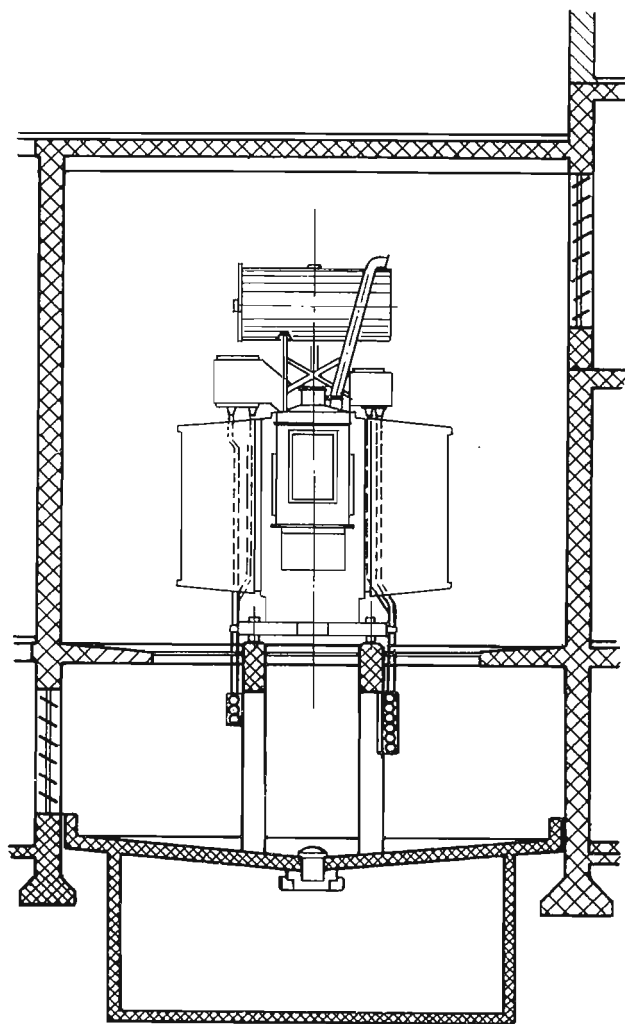



Fig. 74 – Vista d'assieme dei dispositivi di raffreddamento e della vasca per la raccolta dell'olio per trasformatori installati in locali protetti.

Il motore è comandato da speciali dispositivi sensibili alla temperatura (termostati).

In alto a destra è visibile la bocca d'uscita dell'aria di raffreddamento, dotata di un dispositivo uguale.

In genere i termostati, oltre a chiudere le serrande, provvedono allo sganciamento del sistema antincendio, in questo caso costituito dall'immissione automatica di anidride carbonica (CO_2).

Come è possibile rilevare dall'esposizione, i metodi di costruzione dei pozzetti di raccolta dell'olio possono essere concettualmente diversi, pur dovendo, in definitiva, rispondere compiutamente ai postulati posti alla base del problema.

CAPITOLO VI

PROTEZIONE DEI TRASFORMATORI

Proteggere un trasformatore dalle cause che possono rendere inefficiente la macchina, significa usare, con cognizione di causa le apparecchiature e gli accorgimenti necessari affinchè gli effetti di determinati fenomeni vengano eliminati, e quando questo non è possibile, attenuati in modo che gli inevitabili danni si riducano al minimo possibile.

Le cause che possono provocare il guasto di un trasformatore installato in una cabina di trasformazione possono essere raggruppate in due categorie:

— cause esterne alla macchina e non dipendenti da questa;
— cause interne alla macchina, derivanti dal tipo di costruzione e dai fenomeni intrinsechi che in essa si svolgono.

Si definiscono cause esterne tutte quelle che, pur producendosi nettamente al di fuori del trasformatore, hanno come conseguenza sollecitazioni meccaniche o termiche sufficienti a produrre, all'interno di essa, deficienze tali da impedirne il regolare funzionamento.

Le cause esterne di guasto, mediamente più frequenti, sono:

— sovratensioni d'origine atmosferica, dovute ad onde di sovratensione conseguenti le fulminazioni dirette o indirette degli elettrodotti di alimentazione, che si verificano in special modo nelle reti esposte formate essenzialmente da linee aeree;
— sovratensioni d'origine interna, dovute a variazioni schematiche della rete derivanti da guasti o da bruschi distacchi di carico;
— corti circuiti che si producano nella rete alimentata dalla macchina;
— sovraccarichi continui.

Fra le cause interne che mediamente si riscontrano con maggior frequenza e che sono in grado di produrre fenomeni di guasto nel trasformatore, sono da annoverare:

— deficienze d'isolamento negli isolanti che avvolgono i conduttori degli avvolgimenti;

— acidità dell'olio contenuto nella macchina;

— sovrariscaldamenti localizzati nel nucleo magnetico;

— deficienze nel raffreddamento del trasformatore;

— ostruzione dei canali interni che permettono e facilitano i moti convettivi dell'olio;

— formazione di rivestimenti coibenti sui conduttori;

— formazione di ossidi metallici che raccogliendosi sugli avvolgimenti diminuiscono le distanze isolanti previste dal costruttore;

— diminuzione sentita del valore di rigidità dielettrica dell'olio;

— perdite rilevabili nel cassone di contenimento che fanno scendere il livello dell'olio oltre i limiti consentiti.

Per le macchine isolate in aria, immuni dai guasti insiti nell'olio, occorre aggiungere alle cause esterne di guasto le seguenti:

— deficienza d'isolamento dovute ad ambienti eccessivamente umidi;

— infiltrazioni d'acqua penetranti nel locale della cabina dal soffitto e interessanti la zona di posa del trasformatore, o le sue immediate vicinanze;

— allagamenti del locale anche contenuti entro limiti non pericolosi per le apparecchiature a media tensione;

— azione dei roditori sugli isolanti degli avvolgimenti;

— eventuali deficienze d'isolamento dovute a sollecitazioni meccaniche conseguenti il trasporto.

PROTEZIONE DEI TRASFORMATORI DALLE SOVRATENSIONI D'ORIGINE ATMOSFERICA E INTERNA

Il problema della protezione dei trasformatori dalle sovratensioni offre un vasto campo di studio.

In forma preventiva esso investe la costruzione delle macchine, che devono superare, al collaudo, sollecitazioni di valore definito, mentre la protezione, attuata con apparecchiature appositamente studiate e scelte caso per caso, deve contenere le sollecitazioni che si possono verificare in esercizio nei limiti per i quali la macchina è stata prevista.

Nella trattazione, dopo un rapido esame dei criteri con i quali si stabilisce il livello di protezione, in funzione del livello di isolamento, verranno considerati i vari tipi di apparecchiature di protezione, in vista di definire i criteri di scelta e di posa ad essi afferenti.

Un lato molto interessante del problema è dato dall'onere che la protezione comporta, che, ai fini della convenienza, deve essere comparato, oltre al valore intrinseco della macchina da proteggere, anche ad altri fattori, come la natura e la continuità del servizio, che sfuggono all'analisi generalizzata.

Livelli d'isolamento e di protezione

Il livello d'isolamento, nei trasformatori, si verifica in sede di collaudo, sottoponendo gli avvolgimenti alle prove di tensione a frequenza industriale e tenuta ad impulsi, ai valori di tensione previsti dalle Norme CEI e indicati nella tabella 47.

I livelli d'isolamento previsti per le macchine garantiscono dai danni che potrebbero essere provocati da sovratensioni d'origine interna e d'origine atmosferica, i cui limiti siano contenuti entro quelli fissati dalle Norme, ma è altresì evidente che i valori citati non possono essere considerati come i massimi possibili.

Per contenere le sovratensioni di origine atmosferica entro limiti tollerabili, occorre quindi che, negli impianti, vengano installati opportuni dispositivi di protezione, coordinando le caratteristiche protettive con quelle d'isolamento della rete.

Il concetto che sta alla base del coordinamento dei livelli d'isolamento e di protezione è illustrato nel grafico riportato nella figura 75, nel quale, la curva distinta con la lettera A, rappresenta la curva tensione di scarica/tempo, relativa ad un trasformatore appartenente alla classe d'isolamento 20 kV, mentre la curva contrassegnata dalla lettera B rappresenta l'andamento del livello di protezione, in funzione del tempo, relativo all'apparecchiatura di protezione predisposta.

È evidente che la curva A è « protetta » dalla curva B, mentre il margine di sicurezza esistente fra le due curve, è sufficiente a garantire la macchina dalle modifiche abnormi che possono verificarsi, per varie cause, nelle due curve e dagli effetti secondari relativi alle connessioni.

Le modalità per la determinazione delle curve sono messe in evidenza nella fig. 76. L'andamento della caratteristica tensione-tempo è funzione del tipo d'isolante e della forma degli elettrodi.

Il « livello d'isolamento », rappresenta quindi il valore della tensione impulsiva che il trasformatore può essere in grado di sopportare senza danni, mentre, il « livello di protezione » è rappresentato dalla massima tensione che può verificarsi ai capi delle apparecchiature di protezione.

TABELLA N. 47 – **Valori della tensione di prova a frequenza industriale e ad impulsi secondo Norme CEI 8-5/1954.**

Tensione nominale d'isolamento (kV)	A frequenza industriale per un minuto (1) (kV)	Ad impulsi di forma 1/50 (2) (kV)
0,05	0,5	—
0,25	1,5	—
0,4	2	—
(0,5)	2,5	—
3	16	45
6	22	60
10	28	75
15	38	95
20	50	125
30	70	170

(1) I valori indicati valgono sia per gli isolanti in olio, sia per quelli in aria. Per questi ultimi la prova va eseguita a secco sul materiale per interno e sotto pioggia su quello per esterno.

(2) Tensione di tenuta a impulso a secco per onda piena 1/50 μs positiva e negativa.

La definizione dei due concetti sottintende una ulteriore considerazione, ossia che, ai fini della scelta delle protezioni di un impianto, come valore del livello d'isolamento, deve essere assunto il minore fra quelli relativi alle macchine installate; risulta evidente la convenienza di prevedere, per macchine destinate ad una stessa rete, un uguale valore del livello d'isolamento.

Di notevole interesse per i problemi esposti è la caratteristica tensione-tempo relativa ai vari materiali isolanti, che è rappresentata da un grafico nel quale sono riportate le tensioni di cresta, in funzione del tempo di scarica, per una serie di impulsi di forma determinata.

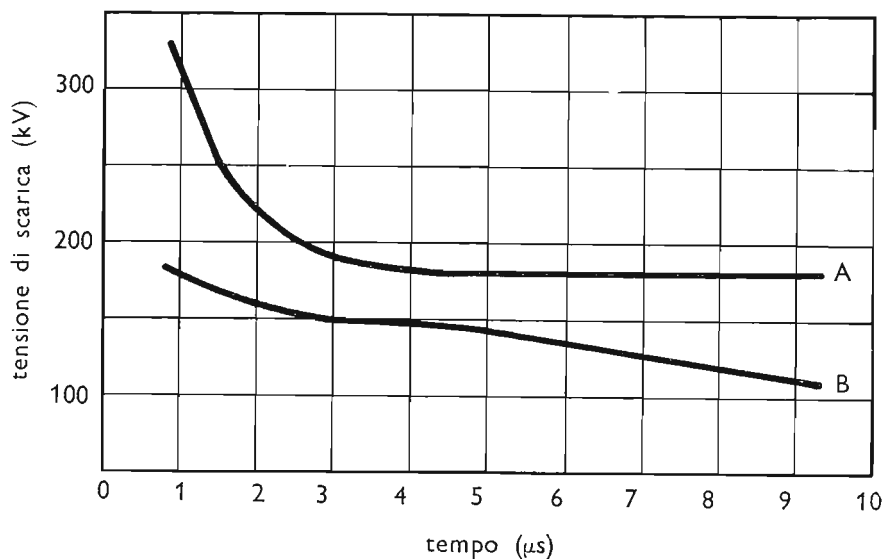



Fig. 75 – Curve caratteristiche tensione di scarica/tempo riferite ad un trasformatore e ad un dispositivo di protezione.

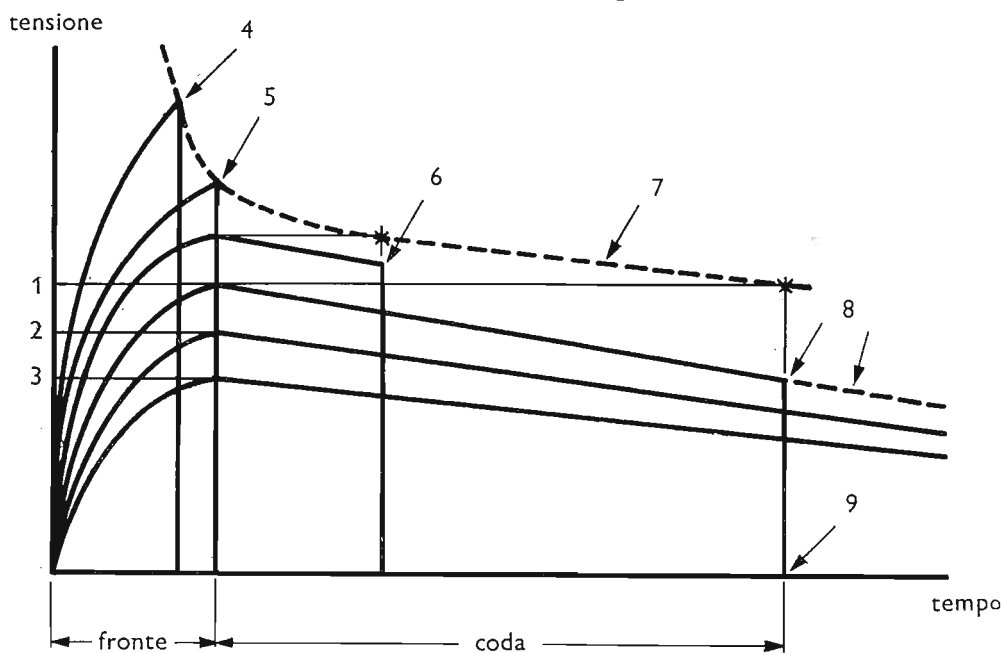



Fig. 76 – Modalità per la determinazione delle curve caratteristiche tensione di scarica tempo.

1) tensione critica di scarica; 2) tensione critica di tenuta; 3) tensione di tenuta; 4) scarica sul fronte; 5) scarica sulla cresta; 6) scarica sulla coda; 7) curva tensione-tempo; 8) tensione di scarica al 50%; 9) tempo di scarica critica.

A titolo comparativo, nella fig. 77, sono riportate le curve relative all'isolamento di un trasformatore e a due dispositivi di protezione coordinati, ossia uno spinterometro ad aste e uno scaricatore a resistenza non lineare.

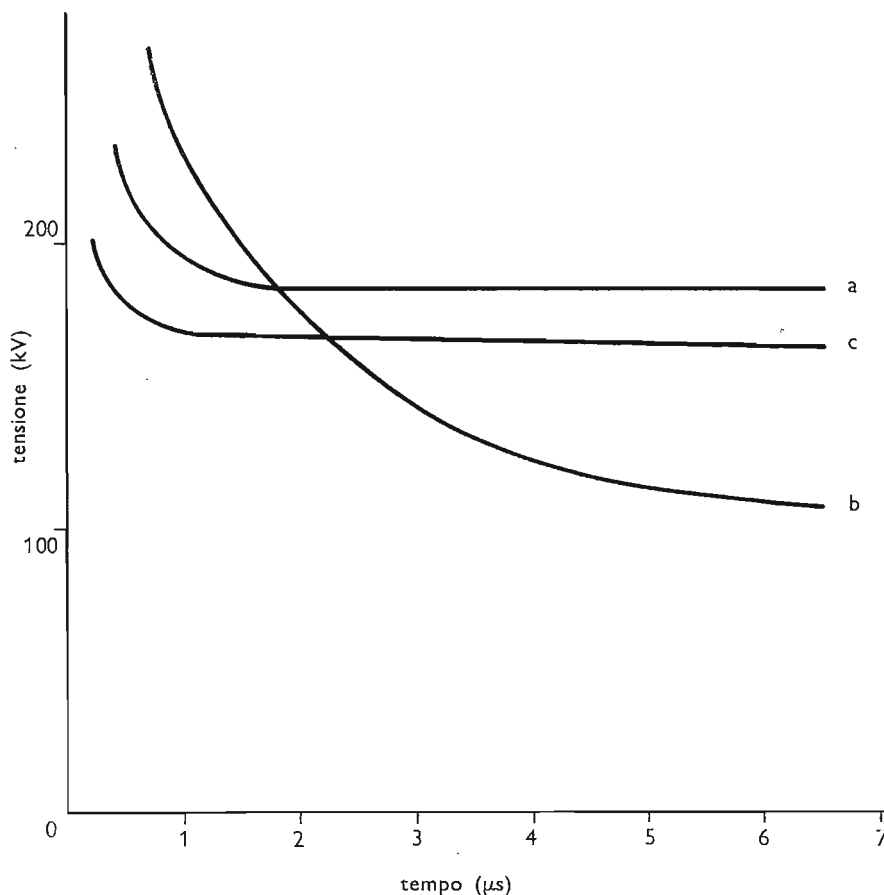



Fig. 77 – Curve caratteristiche tensione di scarica/tempo:
a) trasformatore; *b*) spinterometro ad aste; *c*) scaricatore a resistenza non lineare.

Dalla figura si rileva che lo spinterometro ad aste costituisce una protezione adeguata per i tempi più lunghi, mentre, nel caso di onde impulsive con fronte inferiore a 2 μs, la sua azione non è sufficiente a proteggere la macchina.

Criteri di protezione e tipi di scaricatori

La protezione dei trasformatori installati nelle reti di distribuzione, dalle sollecitazioni conseguenti le scariche atmosferiche, deve possedere due requisiti essenziali: fornire un elevato grado di sicurezza funzionale e comportare un onere modesto.

L'elevato rapporto esistente fra i valori dei livelli d'isolamento ad impulsi, e quelli a frequenza industriale (tab. 48) costituisce un vantaggio notevole e facilita la scelta delle protezioni che devono essere adottate.

Prima di passare alla descrizione dei vari tipi di scaricatori è opportuno precisare i requisiti che un'apparecchiatura ideale dovrebbe offrire:

1) non deve intervenire per qualunque valore della tensione normale o anormale a frequenza industriale, assumendo, anche in presenza di sovratensioni di origine interna, la stessa funzione di un isolatore;

2) il suo intervento deve svolgersi con una notevole velocità di risposta, quando venga sollecitato da una sovratensione d'origine atmosferica, il cui valore sia superiore al livello di isolamento;

3) deve essere in grado di sopportare, senza danni, le correnti di scarica dopo l'innesco, mantenendo il valore della tensione, che in quel momento si manifesta ai terminali delle macchine da proteggere, entro i limiti definiti dal livello d'isolamento.

4) la corrente a frequenza industriale che, dopo l'innesco, attraversa la protezione, deve essere interrotta nel minor tempo possibile, non appena la sovratensione sia scesa al di sotto del livello di adescamento.

Attraverso la descrizione costruttiva e funzionale degli scaricatori di normale costruzione, sarà possibile rendersi conto della corrispondenza di questi apparecchi alle necessità di protezione esposte.

Scaricatori ad aste

Sui passanti dei trasformatori unificati sono previsti gli scaricatori ad aste (fig. 78) formati da due elettrodi in tondo di ferro, dei quali uno è collegato metallicamente con il morsetto di alimentazione della macchina, e l'altro è fissato alla carcassa.

La forma dello scaricatore deve essere tale da mantenere, fra le punte spinterometriche e il sopporto isolante, una distanza pari ad almeno la metà della distanza esplosiva.

TABELLA N. 48 – **Caratteristiche degli scaricatori a resistenza non lineare secondo le Norme IEC 99-1/1958.**

Tensione nominale	Tensione minima d'adescamento a frequenza industriale	Ripidità convenzionale del fronte d'onda	Scaricatori 10.000 A			Scaricatori 5000 A			Scaricatori 2500 A			Scaricatori 1500 A	
			Tensione massima di adescamento ad impulsi		Tensione residua alla corrente nominale	Tensione massima di adescamento ad impulsi		Tensione residua alla corrente nominale	Tensione massima di adescamento ad impulsi		Tensione residua alla corrente nominale	Tensione massima d'adescamento ad impulsi sul fronte	Tensione residua alla corrente nominale
			onda 1/50	sul fronte		onda 1/50	sul fronte		onda 1/50	sul fronte			
(kV)	(kV)	(kV/μs)	(kV)	(kV)	(kV)	(kV)	(kV)	(kV)	(kV)	(kV)	(kV)	(kV)	(kV)
0,280	0,7	10	—	—	—	—	—	—	—	—	—	3,0	2,5
0,500	0,8	10	—	—	—	—	—	—	—	—	—	4,0	3,0
0,660	1	10						—		—	—	6,0	5,0
3	4,5	25	13	15	14	15,5	18	15,5	15,5	18	15,5	—	—
4,5	7	37	17,5	20	17,5	20,5	24	20,5	20,5	24	20,5	—	—
6	9	9	22,5	26	22,5	26	30	26	25	30	26	—	—
9	14	75	32,5	38	32,5	36,5	42	36,5	36,5	42	36,5	—	—
12	18	100	43	50	43	47	54	47	47	54	47	—	—
13	20	110	47	54	47	50	58	50	50	58	50	—	—
15	23	125	54	62	54	58	67	58	58	67	58	—	—
18	27	150	65	75	65	69	80	69	69	80	69	—	—
20	30	170	72	83	72	76	88	76	76	88	76	—	—
25	38	210	90	105	90	94	110	94	94	110	94	—	—
30	45	250	108	128	108	108	125	108	—	—	—	—	—
37	56	310	133	155	133	133	155	133	—	—	—	—	—

Nelle figure 79 e 80 sono rappresentati i valori della tensione d'adescamento in funzione della distanza esplosiva per diversi valori del tempo di scarica; è possibile notare il diverso comportamento dell'apparecchiatura in corrispondenza di onde positive o negative.

In genere, mentre i valori indicati si riferiscono alle condizioni normali, (20 °C di temperatura, 760 mm di mercurio di pressione atmosferica, e 68% di umidità relativa) nell'esercizio, per condizioni diverse da queste, si verificano valori delle tensioni di adescamento che differiscono da quelli indicati.

Fig. 78 – Passante unificato per trasformatori con l'applicazione di uno scaricatore ad aste.

Ne consegue che nella caratteristica tensione-tempo, deve essere considerata una fascia di intervento fra le due polarità, come è stato indicato nella figura 81 e siccome il rapporto tra il livello d'isolamento ad impulso e a frequenza industriale è relativamente elevato, si può affermare che lo spinterometro ad aste è in grado di garantire una buona sicurezza di funzionamento con una distanza esplosiva abbastanza elevata, risultando così ridotto il numero degli interventi intempestivi.

Il tipo di scaricatore presentato non può, per evidenti ragioni, una volta innescato, disinnescarsi automaticamente, mancando in esso qualsiasi dispositivo atto allo scopo; quindi, cessata la sovratensione, il corto circuito da essa provocato non può essere estinto che dall'intervento di protezioni da sovracorrente, mediante un'interruzione dell'erogazione d'energia.

Occorre anche notare che, al momento dell'innesco di uno scaricatore ad aste, si verifica la troncatura dell'onda di sovratensione, con notevoli sollecitazioni degli avvolgimenti della macchina.

Fig. 79 – Diagrammi della tensione di adescamento riferiti ad uno scaricatore ad aste (diametro 10 mm) in funzione della distanza esplosiva, per diversi valori del tempo di scarica e per onde di polarità positiva.

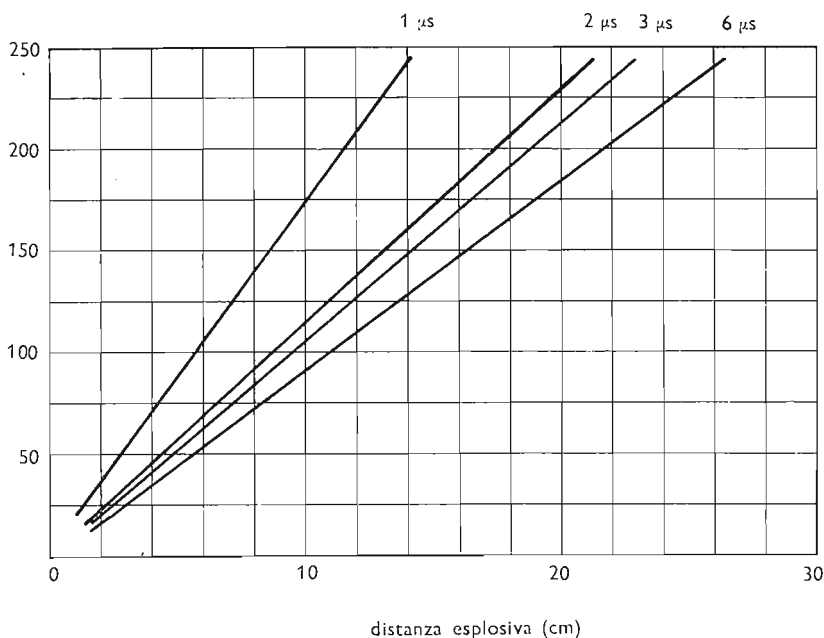



Fig. 80 – Diagrammi della tensione di adescamento riferiti ad uno scaricatore ad aste (diametro 10 mm) in funzione della distanza esplosiva, per diversi valori del tempo di scarica e per onde di polarità negativa.

Per le ragioni esposte la funzione degli scaricatori ad aste, nei dispositivi di protezione, è limitata ad interventi aventi carattere di emergenza.

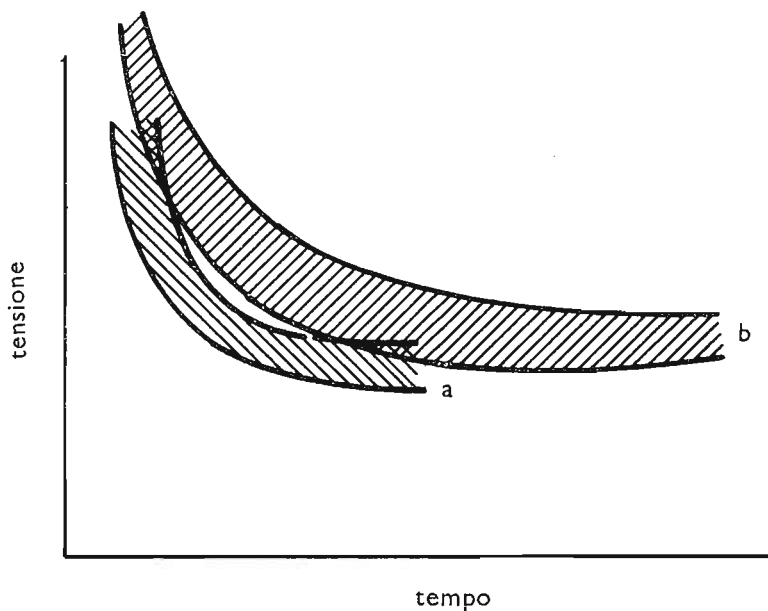



Fig. 81 – Fasce d'intervento riferite ad uno scaricatore ad aste: *a*) onda di polarità positiva; *b*) onda di polarità negativa.

Nelle cabine all'aperto, inserendo sull'elettrodo a massa un riduttore di corrente, è possibile ottenere una buona protezione dalle conseguenze di fulminazioni dirette, provocando l'apertura dell'interruttore d'alimentazione, mediante l'azione di relè eccitati dalla corrente che si stabilisce verso terra (protezione spinterometrica).

Scaricatori a resistenza non lineare

Sono costituiti da una serie di spinterometri intervallati da resistenze di carburo di silicio, la cui caratteristica funzionale è tale da presentare un alto valore di resistenza per la tensione di esercizio, mentre, quando vengano sottoposte alle tensioni più elevate, devono presentare un va-

lore di resistenza molto modesto, per cui, la corrente circolante, provochi una caduta di tensione minore di quella di adescamento (fig. 82).

Il numero degli spinterometri dipende direttamente dal valore della tensione d'innesco e da quella di esercizio.

La funzione degli spinterometri è la seguente:

a) costituire uno spazio isolante per la tensione di funzionamento della rete;

b) adescare l'arco al momento nel quale la sovratensione si presenta ai morsetti dello scaricatore;

c) disinnescare l'arco, quando, esaurita l'onda di sovratensione, la corrente a frequenza industriale che si stabilisce attraverso lo scaricatore, passa per la prima volta per lo zero.

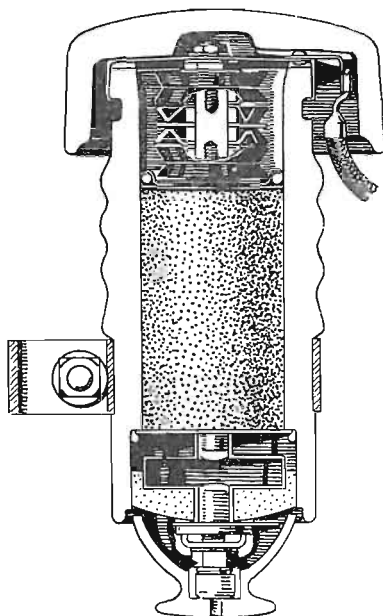



Fig. 82 – Vista in sezione di uno scaricatore a resistenza non lineare adatto per tensioni d'esercizio di 6÷9 kV, tipo Cristal-Valves Belotti.

Con una scelta opportuna del numero degli spazi esplosivi e della forma degli elettrodi, è possibile ottenere un funzionamento comparabile a quello di uno spinterometro a sfere, nel quale la caratteristica tensione-tempo è molto più appiattita di quella che compete agli spinterometri ad aste; inoltre, mediante l'applicazione di speciali artifici, si riesce ad ottenere un rapporto d'impulso molto prossimo all'unità.

La resistenza non lineare dovrebbe presentare un valore infinito fino ad un certo valore della tensione, oltre il quale, per valori crescenti, il valore di resistenza dovrebbe divenire inversamente proporzionale alla corrente che l'attraversa (curva *a* della figura 83).

Evidentemente questo non può essere ottenuto in modo completo anche perchè, per un fenomeno d'isteresi, dovuto al diverso comportamento delle resistenze ai fenomeni che si verificano, la curva della caratteristica volt-ampere ascendente non corrisponde a quella discendente.

La curva *b*, nella figura 83, dà un'idea del comportamento di una resistenza non lineare a base di carborundum; nella stessa figura sono messi in evidenza i valori della tensione residua, della corrente di scarica nominale, della tensione di esercizio e della corrente di fuga.

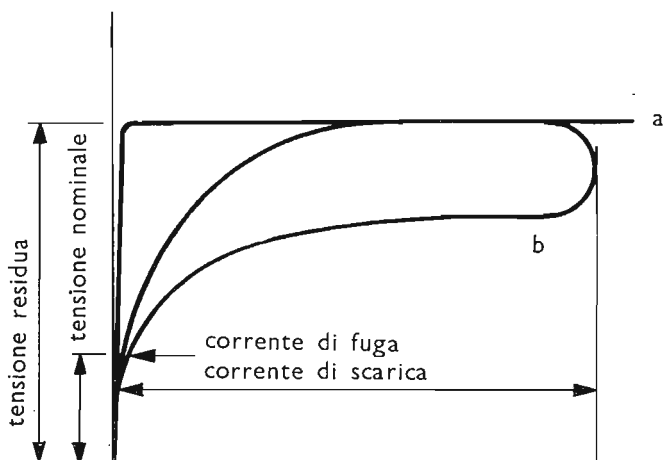



Fig. 83 – Curve caratteristiche tensione/ corrente in uno scaricatore a resistenza non lineare:

a) scaricatore ideale; *b*) scaricatore con resistenze costruite con carburo di silicio.

Le grandezze caratteristiche che definiscono compiutamente uno scaricatore a resistenza non lineare, sono le seguenti:

- — tensione nominale;
- — corrente nominale di scarica;
- — tensione residua;
- — tensione di adescamento a impulsi;
- — tensione di adescamento a frequenza industriale.

Per tensione nominale si intende il massimo valore efficace, specificato, della tensione a frequenza industriale, che può essere ammesso fra il morsetto di linea e quello di terra; per corrente nominale di scarica s'intende il valore della corrente di scarica avente l'ampiezza e la forma d'onda normale 10/20, con la quale si classifica lo scaricatore. A questo valore si riferiscono le caratteristiche di vita e di protezione, poichè l'apparecchio deve essere in grado, e per un numero illimitato di interventi, di scaricare questa corrente senza subire danni.

Per tensione residua, si intende il valore della tensione che si manifesta ai capi dello scaricatore, durante il passaggio della corrente di scarica.

Per tensione di adescamento a impulsi, s'intende il valore della tensione impulsiva, di forma normale 1/50, con la quale si ottiene il sicuro adescamento dello scaricatore.

Per tensione di adescamento a frequenza industriale, si intende il minimo valore di tensione che, applicato ai morsetti dell'apparecchio, provoca la scarica. La definizione dei parametri delle grandezze caratteristiche di uno scaricatore, sono riferite alle condizioni atmosferiche normali di temperatura, altitudine e frequenza d'esercizio, stabilite dalle Norme IEC-99-1/1958.

TABELLA N. 49 – **Grandezze caratteristiche di uno scaricatore a resistenza variabile secondo le norme IEC.**

Tipo di scaricatore (Valore della corrente nominale di scarica) A	Valore di cresta massimo della corrente di forma 5/10 μs (A)
10000	100000
5000	65000
2500	25000
1500	10000

TABELLA N. 50 – **Grandezze caratteristiche degli scaricatori a resistenza variabile in funzione della corrente nominale di scarica.**

Tipo di scaricatore (corrente nominale di scarica) (A)	Valore di cresta della corrente (kA)	Durata convenzionale (μs)
10000	150	2000
5000	75	1000
2500	50	100

Nella tabella 49 sono riportati i valori che devono assumere le grandezze caratteristiche di uno scaricatore a resistenza variabile, perchè venga definito conforme a quanto disposto dalle Norme IEC, in funzione delle tensioni nominali di esercizio, e il tipo di normale impiego.

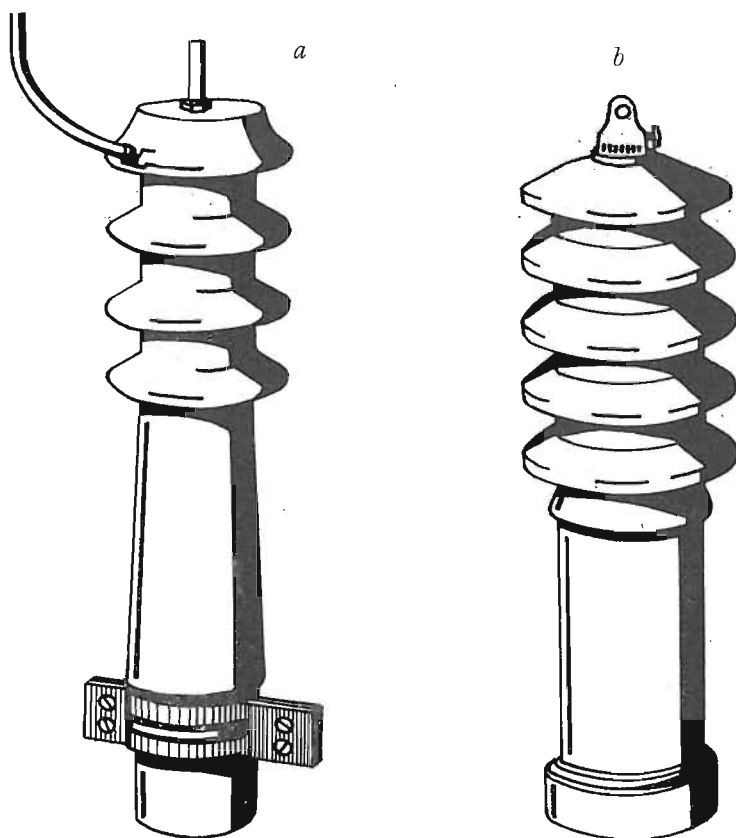



Fig. 84 – Forme esterne di scaricatori a resistenza non lineare: *a*) Magrini tipo LV per 10 kV; *b*) Siemens tipo SAWF per 20 kV.

Qualora la forma d'onda della corrente di scarica avesse una durata inferiore (5/10 μs) lo scaricatore può drenare, per un limitato numero di impulsi, valori di corrente di cresta più elevati.

Nella tabella 50 sono riportati questi valori in funzione della corrente nominale di scarica.

Oltre a ciò lo scaricatore deve essere in grado di sopportare correnti di forma rettangolare, nei limiti indicati nella tabella 50.

Nella figura 84 sono rappresentate alcune forme esterne che assumono gli scaricatori a resistenza variabile, dalle quali si rileva che gli elementi funzionali sono racchiusi in un contenitore isolante sigillato, che garantisce la stabilità dei valori delle tensioni di adescamento, nei riguardi delle condizioni atmosferiche.

Scaricatori ad espulsione

Su un isolatore portante, di speciale conformazione, sono montati due spinterometri in serie, le cui distanze esplosive sono stabilite in modo da determinare il valore della tensione nominale di esercizio, per la quale lo scaricatore è stato costruito (figura 85).

Lo spinterometro contrassegnato con il numero 1 è posto all'esterno, mentre l'altro, contrassegnato con i numeri 2 e 3, si trova all'interno dell'apparecchio.

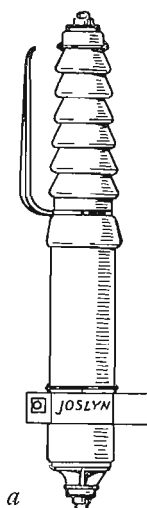
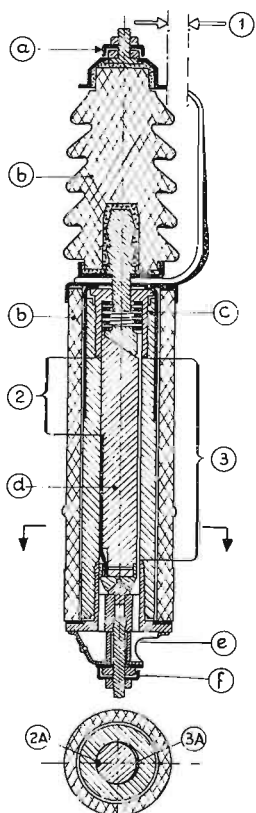



Fig. 85 – Vista in sezione di uno scaricatore ad espulsione d'arco tipo Joslyn (Tecnimex).

1) spinterometro esterno; 2-3) spinterometri interni;

a) morsetto di linea; *b*) isolatore; *c*) tubo di materiale organico; *d*) cilindro di materiale organico; *e*) apertura per l'espulsione del gas; *f*) morsetto di terra.

Al momento in cui la sovratensione si presenta ai capi dello scaricatore, si produce il contemporaneo adescamento degli spinterometri con conseguente scarica, verso terra, della corrente ad impulso.

Esaurito il transitorio impulsivo, la ionizzazione degli spazi spinterometrici, dovuta all'arco generato, tende a mantenere l'arco stesso per la presenza della tensione di rete a frequenza industriale.

Entra allora in funzione il dispositivo di interruzione, costituito dal tubo *c*, nel cui interno è posto, eccentricamente, un cilindro, ambedue formati da materiale organico i cui componenti gassificano rapidamente, per la sollecitazione termica derivante dall'arco. I gas così prodotti, non potendosi espandere nel punto 2, nel quale il cilindro aderisce al tubo, trovano sfogo nella intercapedine 3, scaricandosi all'esterno attraverso l'apertura *e*.

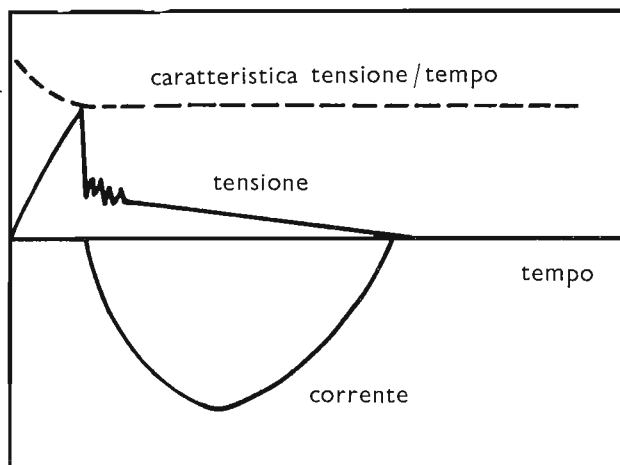



Fig. 86 – Andamento delle tensioni e delle correnti impulsive nella fase di scarica di uno scaricatore ad espulsione.

Questa azione si riflette sull'arco provocandone l'allungamento, la deionizzazione, l'espulsione definitiva e quindi la sua estinzione, entro il primo semiperiodo consecutivo alla fine del transitorio. La corrente di scarica viene così interrotta, e lo scaricatore, che ha subito una minima erosione del materiale organico, è pronto a ripetere l'azione di proprotezione. Nella fig. 85 è rappresentata la forma esterna di uno scaricatore a espulsione, per interno.

Nella figura 86 sono rappresentate le forme che assumono le correnti e le tensioni impulsive durante il funzionamento dello scaricatore, mentre nella figura 87 è indicato l'andamento della corrente e della tensione a frequenza industriale.

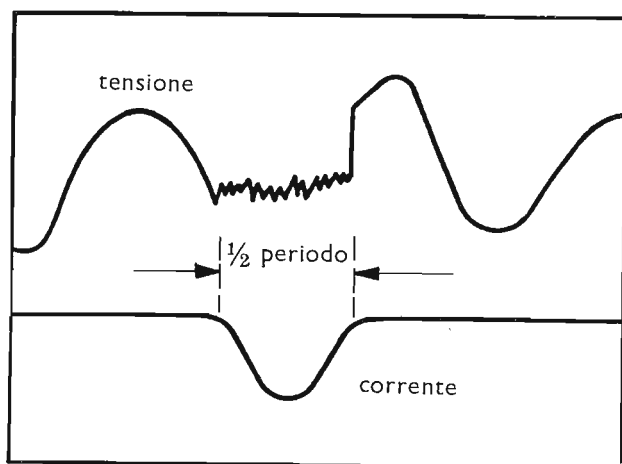



Fig. 87 – Andamento della tensione e della corrente a frequenza industriale nella fase di scarica di uno scaricatore ad espulsione.

Le grandezze caratteristiche che definiscono uno scaricatore di questo tipo sono le seguenti:

— tensione nominale; massimo valore della tensione, a frequenza industriale, che può essere applicata allo scaricatore;

— corrente nominale d'interruzione a frequenza industriale: massimo valore di corrente che può essere interrotto, senza danni allo scaricatore;

— distanza esplosiva dello spinterometro esterno;

— tensione nominale di ristabilimento: valore della tensione che si manifesta ai capi dello scaricatore, dopo l'interruzione della corrente a frequenza industriale;

— tensione di adescamento a frequenza industriale;

— tensione di adescamento ad impulsi di forma normale 1/50 e sul fronte d'onda.

Le caratteristiche riportate, sono riferite alle condizioni normali di funzionamento, e per scaricatori ad espulsione, conformi a quanto è

indicato nel progetto di Norme IEC, devono assumere i valori riportati nella tabella 51.

Le correnti impulsive che gli apparecchi devono essere in grado di scaricare sono:

— 30 kA, con onda 8/20 μs, per apparecchi a bassa capacità di scarica;

— 65 kA, con onda 4/10 μs, per apparecchi aventi capacità di scarica normale.

Nella fig. 88 è riportata la forma esterna di uno scaricatore ad espulsione, per installazione all'aperto con tensioni d'esercizio di 30 kV.

TABELLA N. 51 – **Caratteristiche degli scaricatori ad espulsione secondo le Norme IEC 37-Secr./1959.**

Tensione nominale (kV)	Tensione di tenuta frequenza industriale (kV)	Ripidità convenzioni del fronte d'onda (kV/μs)	Tensione massima di adescamento ad impulsi	
			onda 1/50 (kV)	sul fronte d'onda
3	4,5	25	35	44
4,5	6	37	40	50
6	9	50	45	57
9	14	75	55	75
12	18	100	65	90
15	23	125	70	100
18	27	150	80	120
20	30	170	90	130
25	38	210	110	150
30	45	250	130	175
37	55	310	150	200

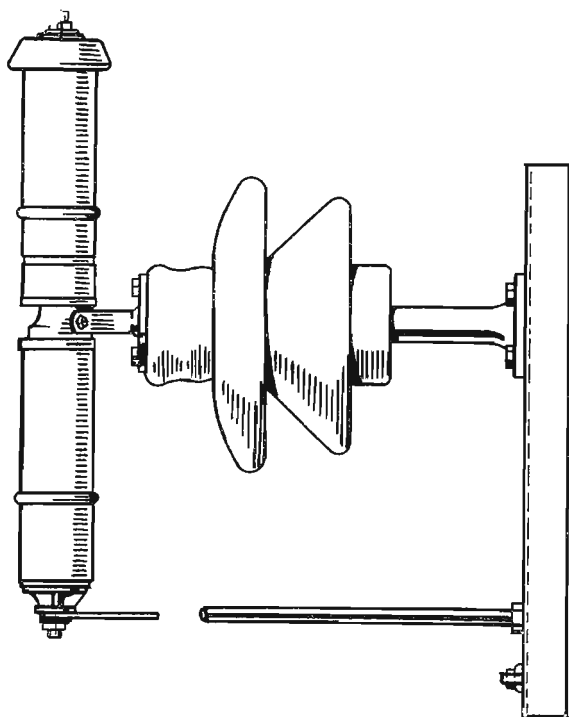
Per le tensioni nominali inferiori a 3 kV non sono fornite indicazioni. In questo caso riferirsi alle caratteristiche fornite dai costruttori.

Confronto tra i due tipi di scaricatori

Prima di passare alla trattazione dei criteri di scelta di uno scarica; tore, è opportuno esporre un confronto fra i tipi descritti.

Una prima differenziazione è resa possibile dal tipo costruttivo- infatti, mentre gli scaricatori a resistenza non lineare, hanno gli elementi

funzionali racchiusi entro contenitori sigillati, e sono quindi sottratti all'influsso delle condizioni atmosferiche, quelli ad espulsione, hanno il dispositivo spinterometrico agente in aria libera, e, naturalmente, risentono delle condizioni atmosferiche, alle quali conseguono sensibili variazioni dei valori di adescamento delle tensioni impulsive e a frequenza industriale. Per le reti di distribuzione il rilievo è di secondaria importanza, stante l'elevato valore del rapporto d'impulso.

Fig. 88.
Forma esterna di uno scaricatore ad espulsione Joslyn tipo Sk (Tecnimex) adatto per tensioni d'esercizio da 20 a 35 kV.

Inoltre, mentre negli scaricatori ad espulsione la tensione residua è praticamente trascurabile, essi ammettono una corrente di fuga di valore elevato.

Attraverso questi rilievi non è possibile stabilire una preferenza fra i due tipi; si può solo dire che lo scaricatore ad espulsione è da ritenersi particolarmente adatto alla installazione sui circuiti della distribuzione rurale, sui quali le probabilità di fulminazioni dirette sono maggiori, e sui quali il valore della corrente di corto circuito è di solito di modeste proporzioni, stante la lunghezza delle linee di alimentazione.

Lo scaricatore a resistenza non lineare deve essere ritenuto più adatto alla installazione nei centri abitati, in riferimento alla elevate correnti di corto circuito che si manifesterebbero con l'uso degli scaricatori ad espulsione, per i quali occorre tener conto anche dei gas di funzionamento, una manifestazione non riscontrabile negli scaricatori a resistenza variabile.

Criteri di scelta di uno scaricatore

Il tecnico che si accinge alla scelta dei dispositivi necessari alla protezione delle macchine installate nelle reti di distribuzione, deve avere a disposizione i seguenti dati:

— valore del livello di protezione, ottenuto in base al livello di isolamento, riferito alla macchina che si intende proteggere;

— valore del sistema di tensioni agenti sulla rete nella quale lo scaricatore deve essere inserito (coefficiente di condizione);

— valore della corrente di corto circuito del sistema, nel punto nel quale lo scaricatore deve essere installato.

Dati forniti da diversi sperimentatori indicano che i valori delle correnti dipendenti direttamente da scariche atmosferiche, sono, di massima, contenuti in 20 kA, anche se è possibile che si verifichino scariche di 100 kA e anche oltre.

Nelle reti di distribuzione si ricorre, generalmente, a scaricatori per 5 kA nominali di scarica, del tipo a resistenza variabile, o a quelli per 30 kA (bassa capacità di scarica) per quelli ad espulsione.

Questo criterio risponde a considerazioni economiche, ed è il risultato di un esame ponderato, tra l'onere dello scaricatore, costo dell'impianto, e probabilità di scariche atmosferiche di valore eccedente quelle ammissibili.

Nel caso di dover proteggere stazioni di particolare importanza, può essere conveniente un orientamento verso tipi più costosi (10 kA nominali per quelli a resistenza variabile; 65 kA per quelli ad espulsione).

Nella scelta degli scaricatori ad espulsione, oltre ai valori della corrente di corto circuito, occorre tenere conto dell'apporto dovuto alle correnti subtransitorie relative ai motori asincroni, che, all'atto del guasto, si comportano come generatori [1].

---

[1] Per più ampi chiarimenti sul calcolo del contributo dei motori asincroni alle correnti di corto circuito vedere Bossi-Coppi, « *Misure elettriche* » Vol. III, Editore Hoepli.

Valutazione della tensione a frequenza industriale che si può verificare ai capi dello scaricatore

Gli scaricatori, progettati e costruiti allo scopo di scaricare alte correnti impulsive, possono essere danneggiati, qualora la corrente di fuga a frequenza industriale, conseguente l'intervento, non venga rapidamente estinta.

Evidentemente questo pericolo è tanto minore quanto più alto è il margine fra il valore della tensione di rete e il valore della tensione che lo scaricatore può sopportare; scegliendo però un margine notevole, si aumenta il valore del livello di protezione a impulsi, e si rischia un non intervento in condizioni di pericolo.

La scelta di questo valore dipende dal « coefficiente delle condizioni della rete trifase rispetto alla terra », che è rappresentato dal valore del rapporto fra la tensione efficace esistente fra la fase, o le fasi sane della rete e la terra, in caso di guasto, e la più elevata tensione efficace tra le fasi della rete, espresso in per cento di quest'ultima.

Il calcolo del coefficiente può essere eseguito con il metodo dei componenti simmetrici, considerando i seguenti casi di guasto:

1) *Corto circuito fra due conduttori di fase*:

indicando con E la tensione di fase del sistema, con Z_1 e Z_2 i valori delle impedenze alle correnti di sequenza positiva e negativa, il valore della tensione, del conduttore di fase non interessato dal guasto, e il punto di guasto, si ricava dalla relazione

$$V = \frac{2\,E}{1 + \frac{Z_1}{Z_2}}$$

nella quale si rileva che, essendo $Z_1 = Z_2$, nel caso di circuiti di distribuzione, non si verifica alcuna sovratensione.

2) *Contatto a terra di un conduttore di fase*:

indicando con Z_0 il valore dell'impendenza alle correnti di sequenza zero, e con R_0 e X_0 la resistenza e la reattanza, relative alla sequenza considerata, il valore della tensione fra uno dei conduttori di fase efficienti e la terra, si ricava dalla relazione

$$V = [-1{,}5\,Z_0\ /\ (Z_1 + Z_2 + Z_0) - j\,0{,}866\,(2\,Z_2 + Z_0\ /\ (Z_1 + Z_2 + Z_0)]$$

dalla quale, ponendo $Z_1 = Z_2$, e trascurando la resistenza di sequenza positiva, si ottiene

$$V = E\left[-1{,}5\left(\frac{R_0}{j\,X_1} + \frac{X_0}{X_1}\right) \Big/ \left(2 + \frac{R_0}{j\,X_1} + \frac{X_0}{X_1}\right) - j\,0{,}866\right]$$

Esaminando il comportamento dell'altro conduttore di fase, non interessato dal guasto, si perviene allo stesso risultato, con la differenza che nell'espressione, l'ultimo termine tra parentesi è di segno positivo.

3) *Contatto a terra di due conduttori di fase*:

dando ai simboli il valore prima esposto, il valore della tensione sul conduttore di fase efficiente, si ricava dalla relazione

$$V = \frac{3\,Z_1\,Z_0}{Z_1Z_2 + Z_1Z_0 + Z_1Z_0}$$

dalla quale, ponendo $Z_1 = Z_2$, si ottiene

$$V = \frac{3\,\dfrac{Z_0}{Z_1}}{1 + 2\,\dfrac{Z_0}{Z_1}}$$

e, trascurando la resistenza di sequenza positiva, avremo

$$V = E\,\frac{3\left(\dfrac{R_0}{j\,X_1} + \dfrac{X_0}{X_1}\right)}{1 + 2\left(\dfrac{R_0}{j\,X_1} + \dfrac{X_0}{X_1}\right)}$$

Nei casi considerati occorre tener presente che i valori di X_0 possono essere negativi (reattanza capacitiva) quando in un sistema a neutro isolato, venga derivata dalla rete esposta, una rete in cavo abbastanza estesa.

Nelle figure 89 e 90 sono riportati gli andamenti delle tensioni relativi ai conduttori di fase non interessati al guasto, in funzione dei rapporti

$$\frac{R_0}{X_1} \text{ e } \frac{X_0}{X_1}$$

nel caso di contatto di uno e di due conduttori di fase con la terra.

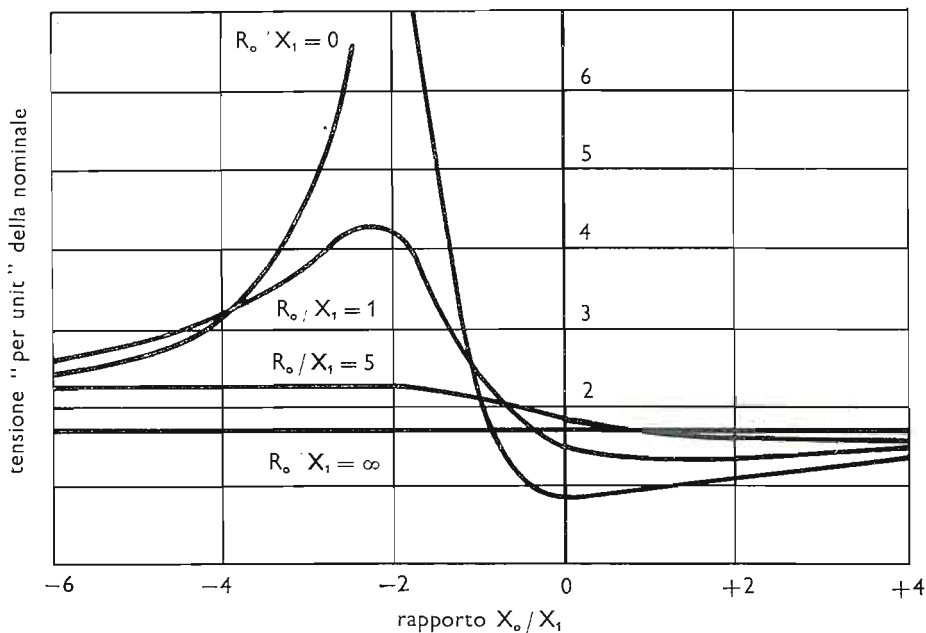



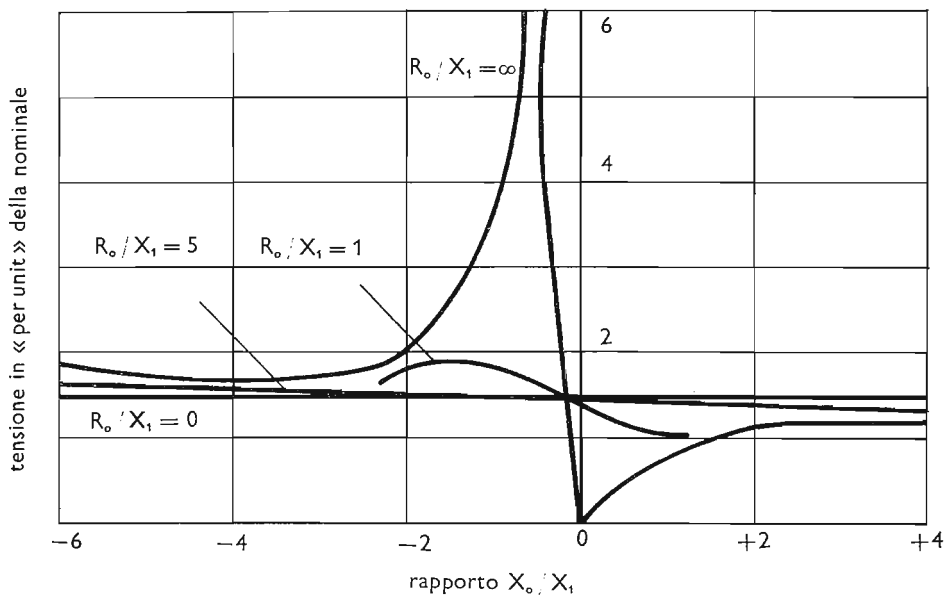
Fig. 89 – Diagrammi delle tensioni fra i conduttori delle fasi sane e la terra, nel caso di contatto a terra di un conduttore di fase, in funzione dei rapporti

$$\frac{R_0}{X_1} \text{ e } \frac{X_0}{X_1}$$

Fig. 90 – Diagrammi delle tensioni fra i conduttori delle fasi sane e la terra, nel caso di contatto a terra di due conduttori di fase, in funzione dei rapporti

$$\frac{R_0}{X_1} \text{ e } \frac{X_0}{X_1}$$

Come è possibile notare, per rapporti di

$$\frac{X_0}{X_1} = -2$$

per fase a terra, e

$$\frac{X_0}{X_1} = -0{,}5$$

per due fasi a terra, le sovratensioni possono assumere valori estremamente elevati.

All'atto pratico, nei sistemi elettrici a neutro isolato, il rapporto

$$\frac{X_0}{X_1}$$

è compreso tra -40 e $-\infty$ e solo raramente può arrivare a valori superiori a -40.

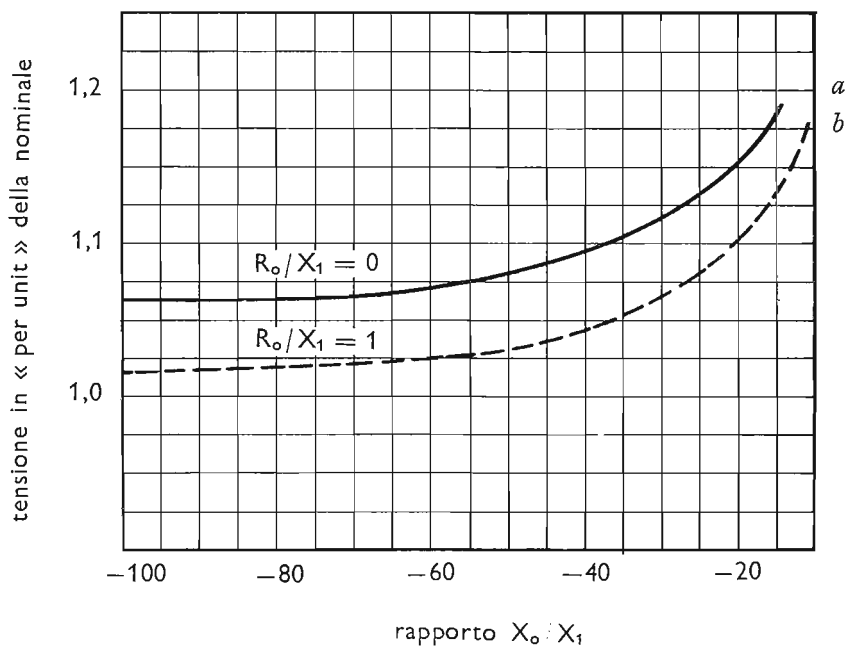



Fig. 91 – Diagrammi delle tensioni fra i conduttori di fase sani e la terra, nel caso di un contatto a terra di un conduttore di fase, in funzione del rapporto $X_0 : X_1$

a) per $\frac{R_0}{X_1} = 0$; *b*) per $\frac{R_0}{X_1} = 1$

Nella figura 91 è riportato l'andamento della tensione verso terra, indicando il rapporto fra la tensione massima verso terra in presenza del guasto, e quella concatenata esistente prima del guasto, in funzione del rapporto

$$\frac{X_0}{X_1}$$

nel caso di fase a terra.

Le due curve si riferiscono, rispettivamente, ai casi di

$$\frac{R_0}{X_1} = 0 \text{ e } \frac{R_0}{X_1} = 1$$

che possono essere considerati come condizioni limite.

Da quanto è stato esposto si rileva che la massima tensione verso terra e per $\frac{X_0}{X_1}$ uguale o inferiore a -40, risulta mediamente uguale a 1,05 volte quella esistente prima del guasto. In questo caso lo scaricatore da usare deve essere adatto per sopportare, fra il morsetto di alimentazione e quello di terra, un valore di tensione praticamente pari alla tensione concatenata fra le fasi, e quindi con un coefficiente di condizione pari al 100%.

Nel caso in cui il rapporto

$$\frac{X_0}{X_1}$$

fosse compreso fra 0 e -40, possono verificarsi tensioni di maggior valore, legate a fenomeni di risonanza e, in tal caso, non esistono regole che consentano, in modo semplice, la scelta dello scaricatore da utilizzare. Onde cautelarsi, in vista di un'eventualità del genere, è consigliabile adottare scaricatori adatti ad un coefficiente di condizione della rete del 110%.

Quando il sistema elettrico funziona con il conduttore neutro connesso con la terra, l'entità delle sovratensioni dovute a guasti verso terra, risulta notevolmente inferiore, avvicinandosi alle condizioni del caso 1°. In genere il coefficiente di condizione della rete non supera l'80%.

La condizione esposta si realizza quando:

a) il rapporto fra la reattanza omopolare e quella diretta è compreso fra 0 e + 3;

b) il rapporto tra la resistenza omopolare e la reattanza diretta è compreso tra 0 e + 1.

TABELLA N. 52 – **Scelta della tensione nominale di uno scaricatore.**

Tensione nominale (kV)	Massima tensione di rete alla quale lo scaricatore può essere utilizzato (kV)		
	Rete con neutro isolato		Rete con neutro effettivamente a terra
	Condizione 100%	Condizione 110%	Condizione 80%
0,280	0,280	0,250	0,350
0,500	0,500	0,450	0,620
0,660	0,660	0,600	0,820
3	3	2,73	3,75
4,5	4,5	4,09	5,62
6	6	5,44	7,5
9	9	8,19	11,3
12	12	10,9	15
13	13	11,8	16,2
15	15	13,6	18,8
18	18	16,4	22,5
20	20	18,2	25
25	25	22,7	31,3
30	30	27,2	37,5
37	37	33,6	46,2

I valori riportati coprono largamente tutti i casi che si possono riscontrare in pratica, negli impianti con neutro a terra, per cui, si ritiene sufficiente, utilizzare scaricatori aventi una tensione nominale d'esercizio pari all'80% di quella concatenata fra le fasi, in assenza di guasto.

Nella tabella 52, in base alle considerazioni fatte, sono state raccolte, in funzione delle tensioni nominali degli scaricatori, le tensioni nominali delle reti sulle quali essi possono essere installati, a seconda del coefficiente che definisce le condizioni della rete.

Criteri di installazione degli scaricatori

L'entità delle sovratensioni, che arrivano o si generano, nella zona prospiciente al punto di installazione del trasformatore da proteggere, e che deve essere scaricata dagli scaricatori, dipende, oltre che dalle grandezze connesse con l'origine del fenomeno, dal sistema usato nella realizzazione dei sopporti scelti per la costruzione della linea elettrica aerea.

Qualora si usino pali in ferro, è da ritenere che il valore massimo della tensione, che si può manifestare ai morsetti degli scaricatori, sia dello stesso ordine di quello corrispondente ad un arco esterno che s'inneschi sulle catene degli isolatori, e cioè, sia compreso fra sei o otto volte quello relativo alla tensione nominale d'isolamento del sistema; quando la linea sia posata su pali di legno, questo valore può essere molto maggiore.

Mentre nel primo caso è sufficiente adottare, come dispositivo di protezione, scaricatori a resistenza variabile adatti per correnti di scarica normale di 2500, o meglio di 5000 A, nel secondo caso occorre non scendere al di sotto di 5000 A, ed è consigliabile orientarsi su quelli da 10.000 A, nell'eventualità di dover prevedere le protezioni per stazioni di una certa importanza, in quanto, questi tipi, consentono una protezione più efficace anche nel caso di fulminazioni dirette.

Evidentemente quanto è stato esposto è valido anche per scaricatori ad espulsione.

Oltre la scelta del tipo, assume un'importanza particolare la posizione nella quale gli scaricatori devono essere posti in opera.

Supponiamo, infatti, che gli scaricatori vengano posati ad una distanza dalla stazione da proteggere, di qualche centinaio di metri. In queste condizioni, quando sulla linea arriva un'onda impulsiva, gli scaricatori limitano il valore della tensione a quello corrispondente al valore della tensione residua caratteristica; l'onda di tensione conseguente si propaga lungo il rimanente tratto di linea sino ad investire il trasformatore.

A questo punto il sistema presenta una discontinuità, nel senso che, essendo il valore d'impedenza del trasformatore molto maggiore di quello relativo all'impedenza caratteristica della linea, si verifica una riflessione positiva al punto di connessione della macchina, che, sommata all'onda incidente, porta la tensione ad un valore che, nella peggiore delle ipotesi, può essere il doppio di quello relativo all'onda incidente (fig. 92).

Il fenomeno assume un'importanza tanto maggiore quanto più ripido è il fronte dell'onda di sovratensione, e qualora si ammetta che questo non assuma valori di velocità di salita superiori a 300 kV/μs, si può dire che la massima distanza di posa di uno scaricatore, dalla macchina da proteggere, qualora si voglia ottenere una protezione efficiente, è compresa, nel caso di reti di distribuzione, fra 15 e 30 metri.

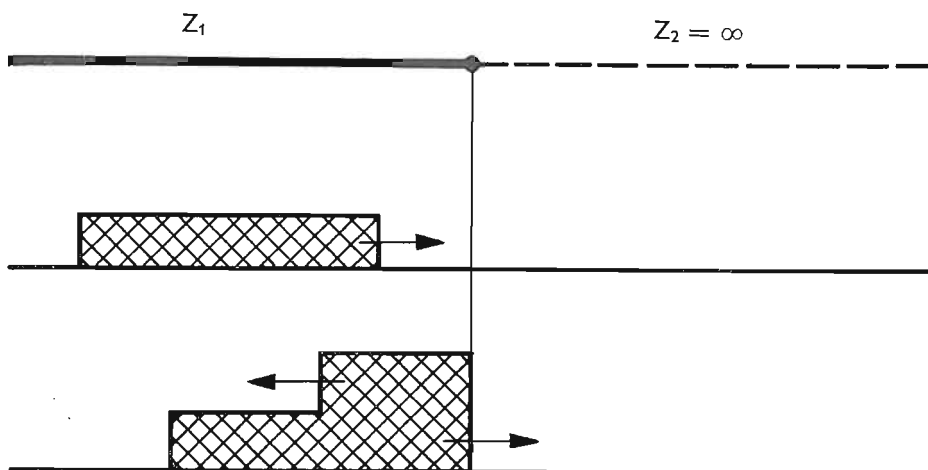



Fig. 92 – Andamento delle riflessioni dell'onda di tensione che si verificano al termine di una linea elettrica a vuoto, o collegata ad un trasformatore.

Esaurito il criterio di scelta del punto più conveniente per la posa degli scaricatori, occorre ricordare che non è possibile ritenere il valore della differenza fra il livello d'isolamento agli impulsi del trasformatore e il livello di adescamento dello scaricatore, come valore del margine di sicurezza del sistema di protezione, non essendo possibile prescindere dalle impedenze relative ai necessari collegamenti e alla resistenza dell'impianto di terra.

Quanto è stato affermato è rilevabile nello schema riportato nella figura 93.

Il valore della tensione, relativo all'onda incidente sul trasformatore, prescindendo dai fenomeni di riflessione, è calcolabile dalla relazione

$$V_t = V_R + V_Z + V_E$$

nella quale V_R rappresenta il valore della tensione residua dello scaricatore, V_Z la caduta di tensione provocata dai conduttori usati per il

collegamento, e V_E la caduta di tensione relativa al valore della resistenza di terra.

Gli effetti sono tanto più sensibili quanto minore è il grado di isolamento del sistema, e quindi quanto minore è il valore della tensione residua dello scaricatore (V_R).

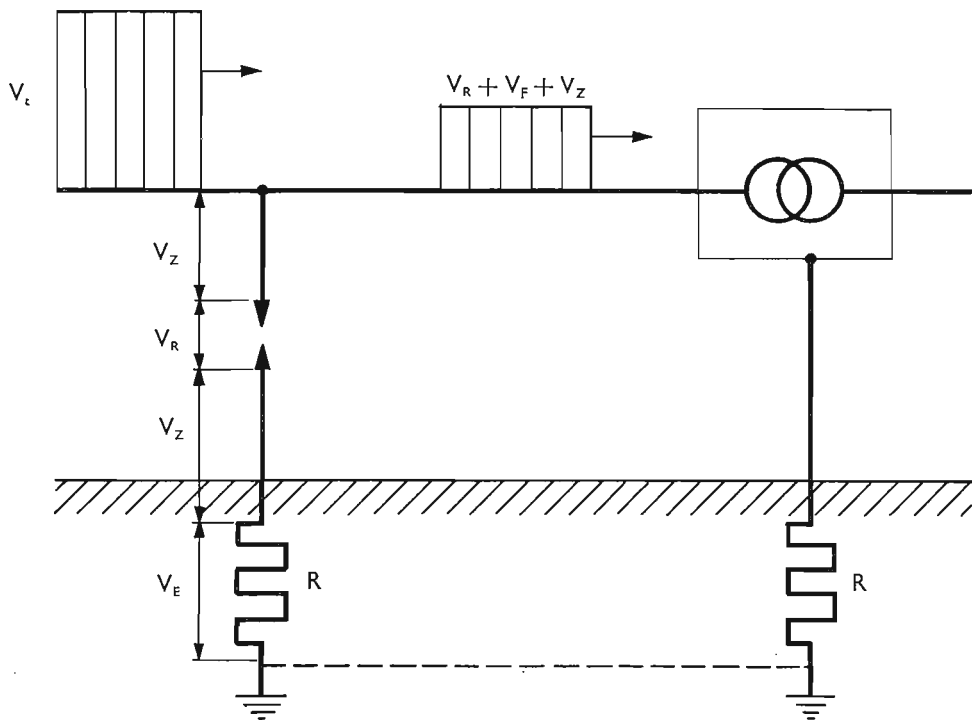



Fig. 93 – Rappresentazione schematica delle tensioni che si trasferiscono su un sistema linea-trasformatore-scaricatore, nel caso di collegamenti irrazionali.

A titolo orientativo è da ritenere che, nel caso di correnti di scarica dell'ordine di 5000 A, con un fronte d'onda di circa 1000 A/μs, un valore della resistenza di terra di 5 ohm, e una lunghezza di connessione di 10 m, il valore della caduta di tensione può essere ritenuto dell'ordine di 35 kV e quindi non trascurabile. La quota parte di maggiore rilievo è quella relativa alla resistenza di terra, che è di 25 kV.

L'inconveniente può essere ovviato qualora si limiti, al minimo possibile, la lunghezza delle connessioni, e si colleghi la cassa del trasformatore alla terra dello scaricatore, come è indicato nella figura 94.

Onde evitare valori troppo elevati delle tensioni di passo, è necessario che il valore della resistenza di terra sia il minimo ottenibile, in relazione anche alle sollecitazioni che si possono verificare sulla parte secondaria a bassa tensione.

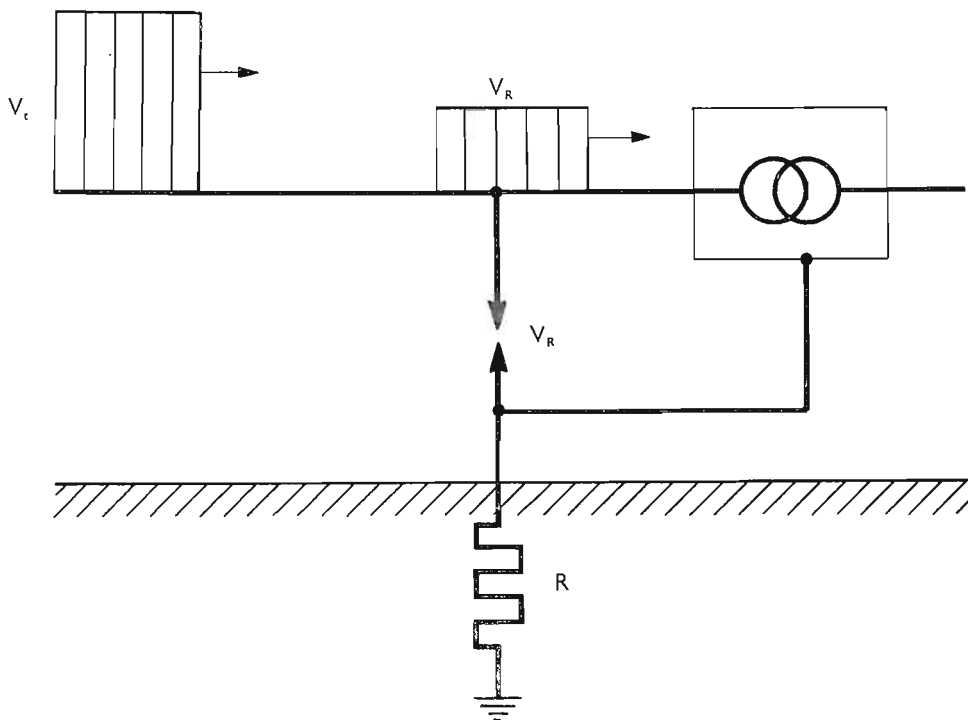



Fig. 94 – Rappresentazione schematica delle tensioni che si trasferiscono su un sistema linea-trasformatore-scaricatore, nel caso di collegamenti razionali.

In conclusione, si può dire che, il valore massimo di protezione si ottiene qualora, il morsetto di terra dello scaricatore, venga collegato, direttamente, alla carcassa del trasformatore, mediante conduttori di lunghezza limitata.

Nel caso che il secondario del trasformatore funzioni senza centro a terra, è opportuno prevedere una protezione anche su questo avvolgimento, mediate un piccolo scaricatore ad aste o di altro tipo posto fra il conduttore neutro, o tra uno dei conduttori di linea e la carcassa del trasformatore, onde ovviare ad eventuali tensioni di trasferimento.

Quando la distribuzione sia prevista con linee elettriche aeree, sul lato di bassa tensione del trasformatore, dovranno essere posti scaricatori, per i quali le modestissime probabilità di fulminazioni dirette, su linee che si svolgono pressochè completamente entro centri abitati, consigliano, anche per un criterio di economia, di utilizzare tipi per correnti di scarica non superiori a 2500 A.

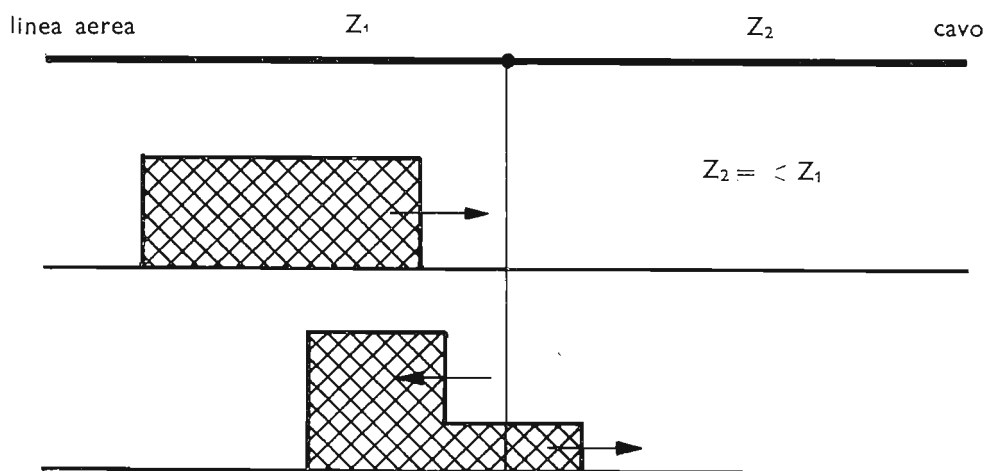



Fig. 95 – Andamento delle riflessioni dell'onda di tensione che si verificano nel punto di connessione fra una linea elettrica aerea e un elettrodotto in cavo.

Qualora all'entrata della stazione o della cabina sia previsto un tratto di cavo, è necessario adottare particolari accorgimenti, poichè la sovratensione che si propaga sulla linea, arrivando al cavo, subisce riflessioni alle quali conseguono modifiche della sua forma d'onda; dato che l'impedenza caratteristica di un cavo può essere compresa fra 50 e 100 ohm, l'onda di tensione trasmessa a questo è dell'ordine di 1/5 di quella proveniente dalla linea, mentre gli altri 4/5, vengono riflessi con polarità invertita (fig. 95).

Quando il cavo abbia una lunghezza di qualche centinaio di metri, è da ritenere che esso stesso costituisca una sufficiente protezione per il trasformatore, mentre, quando la sua lunghezza è limitata a qualche decina di metri, il problema si presenta con aspetti molto diversi.

Se l'onda impulsiva presenta una coda sufficientemente lunga, e tenendo presente che la velocità di propagazione in un cavo è da rite-

nersi circa la metà di quella in una linea aerea, il valore della tensione alle due estremità del cavo aumenta per gradini (fig. 96) raggiungendo il valore massimo in un tempo abbastanza lungo, tanto maggiore è la

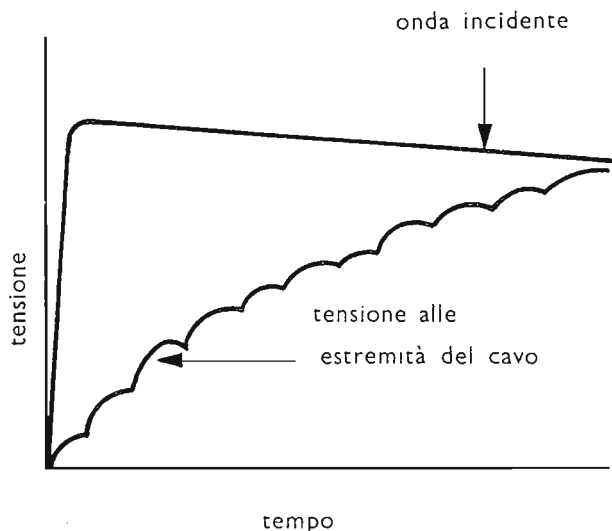
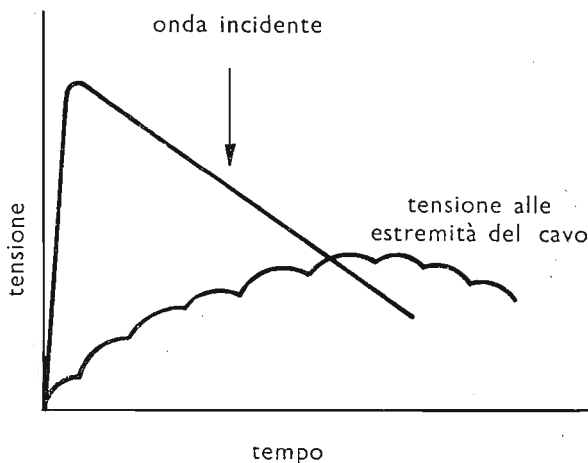



Fig. 96.

Andamento delle riflessioni dell'onda di tensione alle estremità di un elettrodotto in cavo di lunghezza modesta, nel caso di onda incidente con coda lunga.

Fig. 97.

Andamento delle riflessioni dell'onda di tensione alle estremità di un elettrodotto in cavo di lunghezza modesta, nel caso di onda incidente con coda corta.

lunghezza del cavo. Questo valore, all'estremità, può essere più elevato di quello dell'onda incidente a causa delle successive riflessioni, però, se la forma d'onda risulta troncata dopo un tempo abbastanza breve,

o presenta una coda di breve durata, il valore della tensione all'estremità del cavo è notevolmente ridotto (fig. 97).

Nei due casi considerati l'azione del cavo provoca un aumento della durata del fronte, e quindi, sotto questo punto di vista, costituisce, in una certa misura, una protezione del trasformatore.

L'installazione di uno scaricatore, nel punto di connessione fra la linea e il cavo, sarebbe completamente inutile, poichè esso interverrebbe dopo che il trasformatore è stato sottoposto alla sovratensione.

La protezione deve essere invece posta ad una certa distanza dalla testa del cavo, lungo la linea aerea; per cavi aventi una lunghezza di una ventina di metri, lo scaricatore deve essere installato ad una distanza di 50-70 m.

In questi casi è consigliabile usare scaricatori ad espulsione che provocano, praticamente, la troncatura dell'onda incidente.

Qualora si ritenga necessaria una protezione contro le fulminazioni dirette, all'entrata del cavo, e tenendo conto che non è economicamente conveniente usare la fune di guardia, è consigliabile installare uno scaricatore a corna, avente un livello d'innesco dello stesso ordine del livello di isolamento del trasformatore, e che fornisce un certo grado di protezione nella eventualità considerata.

PROTEZIONE DEI TRASFORMATORI DALLE SOVRACORRENTI CONSEGUENTI I CORTI CIRCUITI

Generalità

I concetti che determinano i criteri di protezione da corto circuito di un trasformatore dipendono dalla zona nella quale il fenomeno ha la sua generazione.

Occorre considerare infatti i punti nei quali può avvenire il corto circuito. Essi, procedendo da monte a valle, sono (fig. 98):

— sui conduttori interposti fra il punto di consegna a media tensione e il trasformatore (*1*);

— fra gli avvolgimenti di fase della macchina (*2*);

— sui conduttori che uniscono il trasformatore all'interruttore generale di bassa tensione (*3*);

— sui conduttori che uniscono l'interruttore a quelli posti sulle testate degli elettrodotti in partenza (*4*);

— sugli elettrodotti in partenza (*5*);

— dopo le derivazioni agli utilizzatori o negli utilizzatori stessi (6).

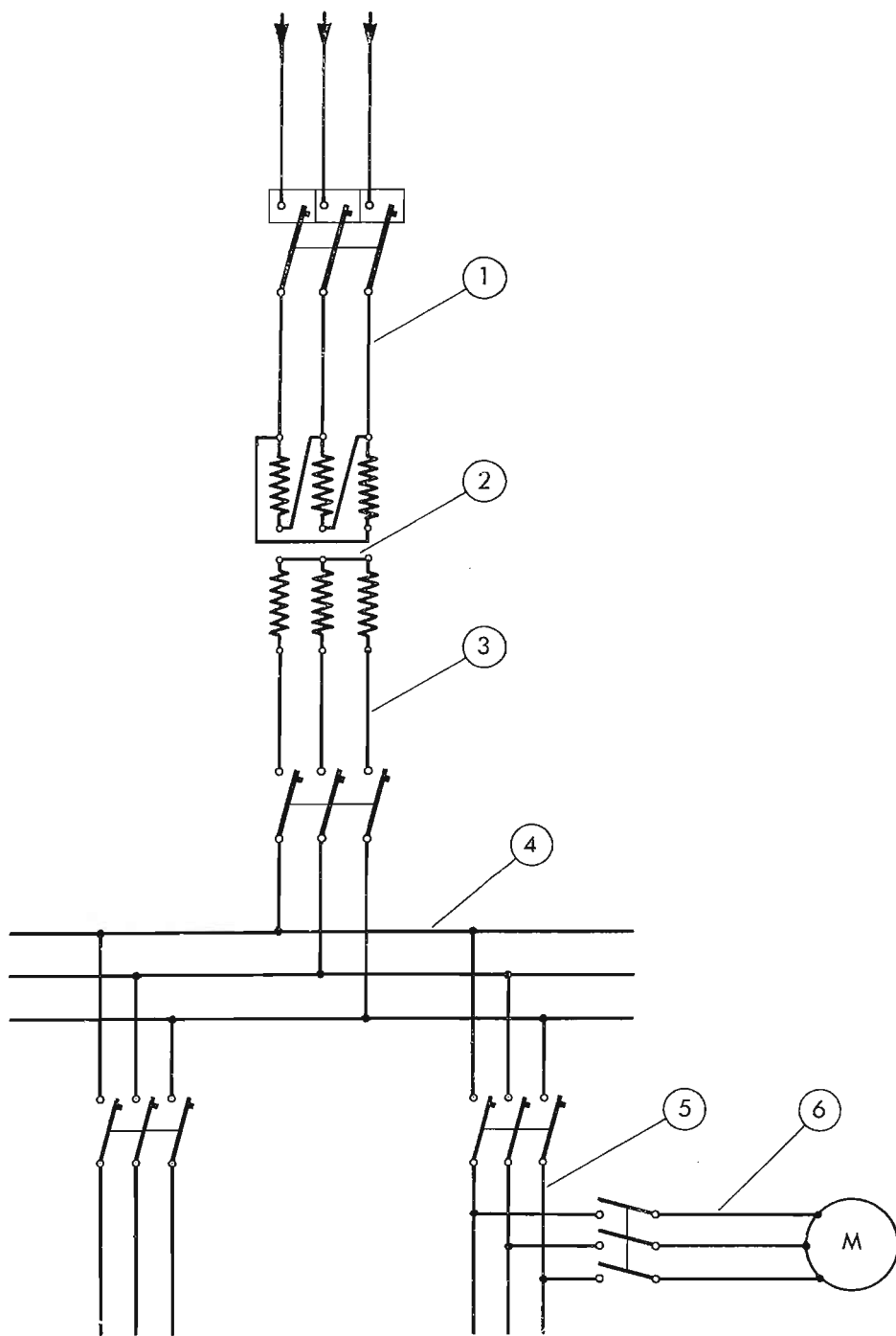



Fig. 98 – Rappresentazione schematica per l'individuazione dei luoghi d'impianto ove possono avvenire corti circuiti.

In sostanza occorrerà considerare per ora una sola divisione fra i punti esposti raggruppando insieme le eventualità riferibili ai punti *1-2-3* e quelle riferibili ai punti *4-5-6*, considerando in definitiva l'impianto come scisso in due parti principali, quella a media e a bassa tensione fino ai codoli superiori dell'interruttore generale installato subito dopo il trasformatore, e quella che si svolge a valle di questo.

La protezione da corto circuito inerente la prima parte, deve essere prevista sulla media tensione, mentre in genere un'interruttore generale di bassa tensione provvederà alla protezione della macchina dalle conseguenze dei fenomeni di corto circuito che dovessero avvenire sulla seconda parte. Vedremo poi quali possono essere le varianti a questo schema e i vantaggi che da esse possono ritrarsi.

La protezione da corto circuito sulla media tensione può essere prevista mediante due tipi di apparecchiature:

— interruttori automatici di massima corrente;
— valvole fusibili.

L'abbinamento dei due sistemi non è consigliabile e, lo si attua in qualche caso nel quale la potenza d'interruzione dell'interruttore non è adeguata al valore della corrente di corto circuito facendo però funzionare l'interruttore come sezionatore sottocarico, e togliendo così a questo apparecchio la possibilità d'intervento automatico.

Dimensionamento e taratura degli interruttori automatici e delle valvole fusibili

La scelta dei parametri relativi alle apparecchiature di protezione è compito del progettista dell'impianto e assume una grande importanza in quanto, non solo ne determina il dimensionamento e i limiti funzionali, ma si riflette sul comportamento dell'impianto quando si dovessero verificare le eventualità considerate.

Per le apparecchiature a media tensione, aventi una funzione protettiva, da installare a monte del trasformatore previsto nella cabina, occorre determinare i seguenti parametri:

— tensione nominale d'esercizio;
— portata nominale in servizio continuo;
— potere d'interruzione;
— taratura dei relè magnetici diretti;
— parametri di funzionamento dell'eventuale bobina di apertura.

PROTEZIONE EFFETTUATA CON INTERRUTTORE AUTOMATICO DI MASSIMA CORRENTE SULLA PARTE A MEDIA TENSIONE

Tensione nominale d'esercizio.

Il valore della tensione nominale d'esercizio, in un interruttore, ne determina il livello d'isolamento a impulso, e deve essere scelto tenendo presenti questi due criteri:

— quando la cabina è alimentata da elettrodotti in cavo, la tensione nominale dell'interruttore può essere prevista uguale, o di poco superiore al valore della tensione nominale che l'Azienda elettrica distributrice dichiara nel contratto di fornitura;

— quando la cabina è alimentata da elettrodotti in linea aerea, e quindi da una rete esposta, è opportuno che la tensione nominale d'esercizio, e quindi il livello d'isolamento a impulso, abbia un valore nettamente superiore; in genere la maggiorazione è consigliabile sia del 15÷20%, onde assicurare all'interruttore una maggiore protezione dalle sollecitazioni derivanti da eventuali sovratensioni d'origine atmosferica.

Portata nominale in servizio continuo.

La portata nominale in servizio continuo degli interruttori automatici di normale produzione è in genere sovrabbondante; il lettore può avere una chiara sensazione di questo confrontando i dati riportati nella tabella 53 nella quale sono riuniti, in funzione della potenza nominale e della tensione d'alimentazione, i valori delle correnti assor-

TABELLA N. 53 – **Valori di corrente assorbibili dai trasformatori trifase in funzione della potenza nominale e della tensione d'esercizio.**

Potenza nominale kVA	Tensione d'alimentazione in kV							
	3 (A)	6,4 (A)	10 (A)	12 (A)	15 (A)	23 (A)	25 (A)	30 (A)
100	19,20	9,00	5,80	4,82	3,85	2,50	2,30	1,92
160	30,72	14,40	9,28	7,71	6,16	4,00	3,68	3,07
200	38,40	18,00	10,16	9,64	7,70	5,00	4,60	3,84
250	48,00	22,50	13,70	12,05	9,62	6,25	5,75	4,75
315	60,48	28,35	18,27	15,18	12,12	7,87	7,24	6,04
400	76,80	36,00	23,20	19,28	15,40	10,00	9,20	7,68
500	96,00	45,00	27,40	24,10	10,20	12,50	11,50	9,50

bite dai trasformatori a pieno carico, con i parametri relativi agli interruttori riportati nelle tabelle 54-55-56-57-58.

È evidente che le portate degli interruttori sono molto al di sopra dei valori occorrenti, in ogni modo è opportuno che il valore della portata non sia mai inferiore al valore della corrente nominale massima assorbibile dalla macchina moltiplicato per 1,2.

Potere d'interruzione.

Il potere d'interruzione di un interruttore, esprime il valore massimo della potenza che l'apparecchio può interrompere, senza che questo provochi danneggiamenti alla macchina. Può trovarsi espresso in MVA od in kA.

È evidente che il valore della corrente di corto circuito che si può stabilire nella cabina non possa dipendere dalla consistenza dell'impianto, quando il corto circuito avviene sui conduttori interposti fra l'interruttore e il trasformatore. Esso infatti è una diretta conseguenza del valore di potenza dei trasformatori posti a monte della rete che alimenta la cabina, e il suo valore varia in ragione inversa dell'impedenza relativa agli elettrodotti di connessione.

Questo valore non è quindi determinabile dal progettista, ma deve essere chiesto alla Azienda distributrice dell'energia, che è l'unica in possesso dei parametri atti al calcolo. La scelta dell'interruttore deve tener conto di questo valore, in modo che l'apertura dello stesso, nella evenienza della massima sollecitazione, non produca danni all'apparecchio, nè dia luogo a fenomeni esterni, come la proiezione di getti d'olio o lo scoppio delle camere d'interruzione che costituirebbero un grave pericolo per gli operatori presenti in cabina.

In genere la corrente di corto circuito che l'interruttore deve poter interrompere, ha un valore notevolmente superiore a quella che verrebbe richiamata dal trasformatore nell'eventualità di un corto circuito franco ai morsetti secondari. In ogni modo nella tabella 59 abbiamo riportato, in funzione della potenza del trasformatore e della tensione d'esercizio, i valori della corrente di corto circuito nei vari casi.

Evidentemente, qualora il valore della corrente di corto circuito fornito dalla Azienda distributrice dell'energia, fosse inferiore al valore della corrente assorbibile dai trasformatori in corto circuito, l'interruttore può essere scelto con un potere d'interruzione adeguato a quello massimo fornito dall'Azienda, in quanto non si può supporre che il fenomeno possa dar luogo ad una corrente di valore maggiore.

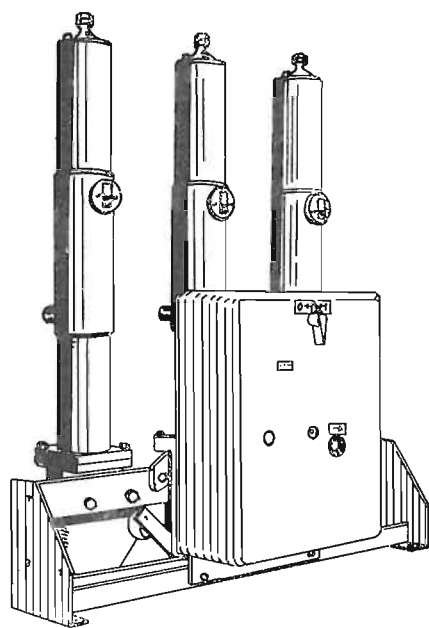



Fig. 100.

Fig. 99.

Fig. 101.

Fig. 99 – Vista esterna di un interruttore automatico Magrini serie MG per media tensione.

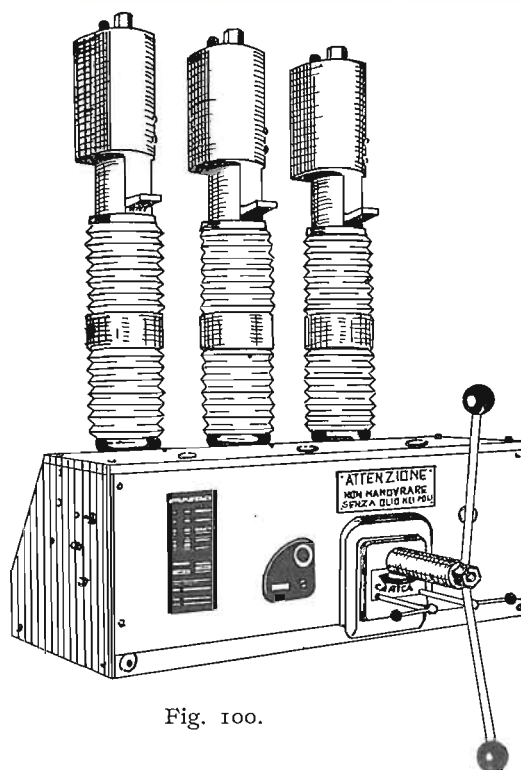



Fig. 100 – Vista esterna di un interruttore automatico Scarpa e Magnano serie MM 12 N per media tensione.

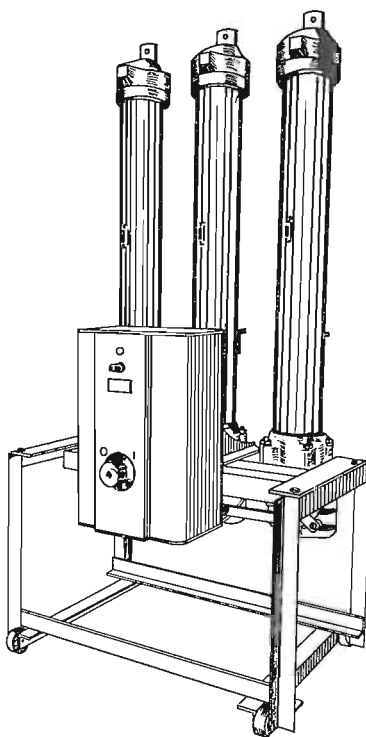



Fig. 101 – Vista esterna di un interruttore automatico SACE serie RM per media tensione.

TABELLA N. 54 – **Caratteristiche degli interruttori automatici a volume d'olio ridotto Magrini serie MG.**

TIPO	Matricola	TENSIONE				CORRENTE								CONSUMI	
		nominale	massimo	di prova		nominale	di breve durata per 3 sec.	di chiusura (valore di cresta)						bobina di apertura e chiusura	Motore
				50 p/s per 1 min.	ad impulso			a 24 kV	a 20 kV	a 17,5 kV	a 15 kV	a 12 kV	a 10 kV		
		(kV)	(kV)	(kV)	(kV)	(A)	(kA)	(kA)	(kA)	(kA)	(kA)	(kA)	(kA)	(W)	(W)
15 MG 150	57 002	15	17,5	45	95	400	8,5	—	—	12,5	14,5	18,3	21,5	200	200
15 MG 250	57 007	15	17,5	45	95	400	14,5	—	—	21	24,5	30,5	37	200	200
15 MG 350	57 006	15	17,5	45	95	360	14,5	—	—	21	24,5	30,5	37	200	200
20 MG 250	57 009	20	24	55	125	360	14,5	15,3	18,4	—	—	—	—	200	200

Poteri d'interruzione (secondo Norme IEC - CEI)

TIPO	a 24 kV		a 20 kV		a 17,5 kV		a 15 kV		a 12 kV		a 10 kV		Ciclo di operazione	
	simmetrico		simmetrico		simmetrico		simmetrico		simmetrico		simmetrico		nominale	con richiusura rapida
	MVA	kA	MVA	kA	MVA	kA	MVA	kA	MVA	kA	MVA	kA		
15 MG 150	—	—	—	—	150	5	150	5,8	150	7,3	150	8,5	0-3′-CO-3′-CO	—
15 MG 250	—	—	—	—	250	8,3	250	9,6	250	12	250	14,5	0-3′-CO-3′-CO	—
15 MG 350	—	—	—	—	350	11,5	350	13,5	350	12	250	14,5	0-3′-CO-3′-CO	0-0,3″-CO
20 MG 250	250	6	250	7,3	—	—	—	—	—	—	—	—	0-3′-CO-3′-CO	0-03″-CO

TABELLA N. 55 – **Caratteristiche elettriche degli interruttori per media tensione. Scarpa e Magnano Tipo M L - M M - M T S.**

Caratteristiche	ML 12 F ML 12 N	ML 17 F ML 17 N	ML 24 N	MM 12 N	MM 17 N	MM 24 N	MTS 12 N	MTS 17 N	MTS 24 N	MTS 36 N
Tensione nominale kV	10	15	20	10	15	20	10	15	20	30
Tensione nominale massima kV	12	17,5	24	12	15,5	24	12	17,5	24	36
Corrente nominale kA	400	400	400	630	630	630	1600-2000	1600-2000	1600-2000	1250
Potere d'interruzione nominale simmetrico kA	8,7	5,8	4,4	20,2	13,5	10,1	57,8	38,5	28,9	19,2
Potenza d'interruzione nominale corrispondente MVA	150	150	150	350	350	350	1000	1000	1000	1000
Potere d'interruzione asimmetrico kA	8,7	5,8	4,4	20,2	13,5	10,1	57,8	38,5	28,9	19,2
Potere di chiusura nominale kA	21,7	14,5	10,9	50,5	33,8	25,3	144,5	96,2	72,3	48
Corrente ammissibile di breve durata (1") kA	8,7	5,8	4,4	20,2	13,5	10,1	57,8	38,5	28,9	9,2
Corrente ammissibile di lunga durata (5") kA	3,9	2,6	1,95	9,04	6,04	4,52	25,6	17,2	12,9	8,6
Tempo di apertura nominale sec	0,08	0,08	0,08	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06
Tempo di chiusura nominale sec.	0,12	0,12	0,14	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,12	0,14
Tempo d'arco sec	0,03	0,03	0,03	0,02	0,03	0,035	0,025	0,030	0,035	0,04

Tabella N. 56 – **Caratteristiche elettriche degli interruttori per media tensione SACE Tipo RM e RG.**

Interruttore tipo	RM 10 RMc 10	RM 20 RMc 20	RMp 20 RMc 20p	RG 6	RG 10	RG 20	RG 20p	RG 30
Tensione nominale kV	10	20	20	6	10	20	20	30
Tensione mass. di eserc. kV	12	24	12	7,2	12	24	12	36
Corrente nominale A	630	630	630	800	800	800	800	800
Frequenza nominale Hz	50	50	50	50	50	50	50	50
Tensione di prova tra fase e massa e tra fase e fase kV	42	64	64	42	42	64	64	86
Tensione di prova tra entrata e uscita della stessa fase kV	46	70	70	46	46	70	70	95
Potere d'interruz. simm.								
a 6 kV kA	19,3	—	19,3	33,8	—	—	—	—
MVA	200	—	200	350	—	—	—	—
10 kV kA	14,4	—	14,4	—	29	—	29	—
MVA	250	—	250	—	500	—	500	—
15 kV kA	—	9,6	—	—	—	19,3	—	—
MVA	—	250	—	—	—	500	—	—
20 kV kA	—	8,65	—	—	—	17,3	—	—
MVA	—	300	—	—	—	600	—	—
25 kV kA	—	—	—	—	—	—	—	11,6
MVA	—	—	—	—	—	—	—	500
30 kV kA	—	—	—	—	—	—	—	11,6
MVA	—	—	—	—	—	—	—	600
Potere di chiusura a 6 kV kA	50	—	50	86	—	—	—	—
10 kV kA	37	—	37	—	74	—	74	—
15 kV kA	—	25	—	—	—	50	—	—
20 kV kA	—	22	—	—	—	45	—	—
25 kV kA	—	—	—	—	—	—	—	29
30 kV kA	—	—	—	—	—	—	—	29
Corrente di breve durata								p
1 sec kA	20	20	20	35	35	35	35	30
5 sec kA	9	9	9	16	16	16	16	14
Tempo di apertura ms	40	40	40	45	45	45	45	45
Tempo di interruzione ms	55	55	55	60	60	60	60	70
Tempo di chiusura ms	120	120	120	120	120	120	120	120
Tensione di tenuta ad impulso kV	75	125	125	75	75	125	125	170

Le tensioni di prova a frequenza industriale sono quelle indicate dalle Norme VDE.

TABELLA N. 57 – **Caratteristiche elettriche degli interruttori per media tensione Vanossi serie A C.**

Tipo	Tensione nominale (kV)	Tensione nominale massima (kV)	Corrente nominale (A)	Potere d'interruzione simmetrico (A)	Potere d'interruzione asimmetrico (A)	Potenza d'interruzione nominale (MVA)	Potere di chiusura nominale (A)	Corrente ammissibile di breve durata (A)	Corrente ammissibile di lunga durata (A)	Tempo di chiusura (μs)	Tempo di apertura (μs)	Tempo d'avvio (μs)
AC 10	10	12	600	9 600	10 600	150	24 500	14 000	6 500	180	35	38
AC 15	15	17,5	600	9 600	10 600	225	24 500	14 000	6 500	180	35	38
AC 20	20	23	600	9 600	10 600	300	24 500	14 000	6500	180	35	38

TABELLA N. 58 – **Caratteristiche degli interruttori per media tensione Voigt e Haeffner serie H. T.**

Tipo	Tensione di isolamento (kV)	Tensione nominale (kV)	Potere d'interruzione nominale (MVA)	Corrente nominale (A)	Limite tensione d'esercizio		Corrente d'apertura al limite inferiore (kA)	Corrente d'apertura al limite superiore (kA)	Corrente di chiusura (kA)	Tempo di apertura (μs)
					inferiore (kV)	superiore (kV)				
LS 14 10/1000-600	10	10	600	1 000	8	11,5	34,6	43,3	110	50 ÷ 65
LS 14 10/2000-600	10	10	600	2 000	8	11,5	34,6	43,3	110	55 ÷ 70
LS 14 10/1000-600/6	10	6	600	1 000	6	6,9	57,7	57,7	150	50 ÷ 65
LS 14 10/2000-600/6	10	6	600	2 000	6	6,9	57,7	57,7	150	55 ÷ 70
LS 14 10/1000-1000/10	10	10	1 000	1 000	10	11,5	57,7	57,7	150	50 ÷ 65
LS 14 20/1000-600	20	20	600	1 000	14	23	17,3	24,8	62	55 ÷ 70
LS 14 20/2000-600	20	20	600	2 000	14	23	17,3	24,8	62	60 ÷ 75
LS 14 20/1000-1000	30	20	1 000	1 000	14	23	28,9	41,2	105	55 ÷ 70
LS 14 30/1000-1000	30	30	1 000	1 000	20	35	19,2	24,1	62	60 ÷ 75
LS 14 30/2000-1000	30	30	1 000	2 000	24	35	19,2	24,1	62	65 ÷ 80
LS 14 30/1000-1500	30	30	1 500	1 000	24	35	28,9	36,1	92	60 ÷ 75

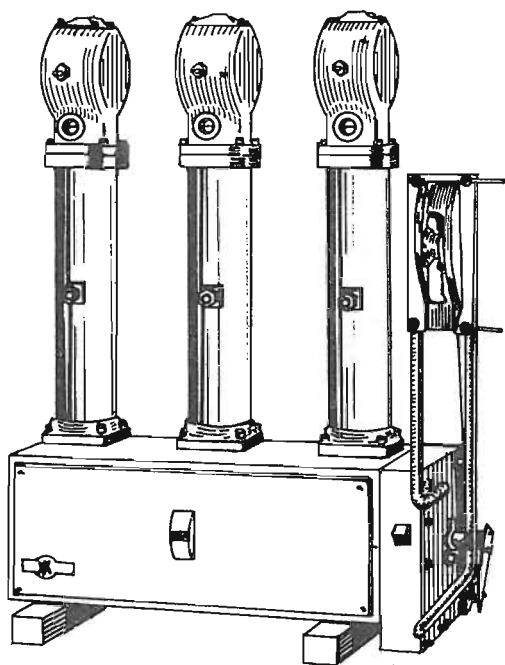



Fig. 102 – Vista esterna di un interruttore automatico Vanossi serie AC per media tensione.

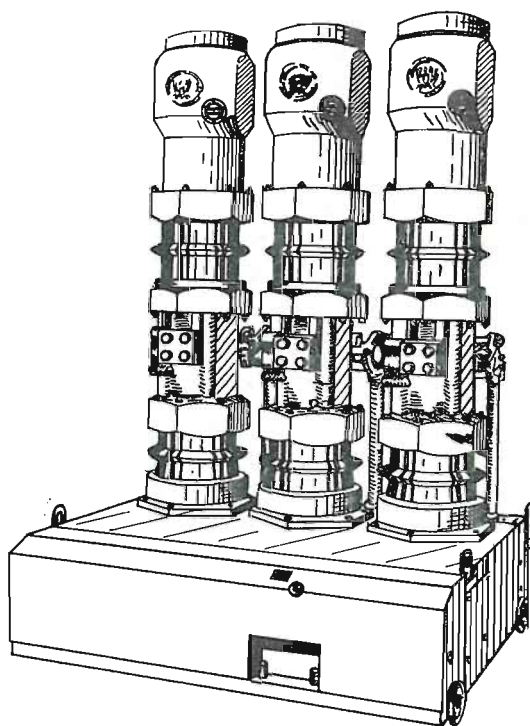



Fig. 103 – Vista esterna di un interruttore automatico Voigt e Haeffner serie HT tipo LS14 per media tensione.

TABELLA N. 59 – **Valori della corrente di corto circuito assorbibile dai trasformatori trifase costruiti secondo il capitolato ANIDEL (V_{cc} = 4,2%) in funzione della potenza nominale e del valore della tensione d'esercizio.**

Potenza nominale (kVA)	Tensione d'esercizio (kV)							
	3 (A)	6,4 (A)	10 (A)	12 (A)	15 (A)	23 (A)	25 (A)	30 (A)
100	460	216	138	115	92	60	55	46
160	740	340	220	184	147	96	88	74
200	920	430	276	230	184	120	110	92
250	1150	540	345	288	230	150	138	115
315	1450	680	435	362	290	189	174	145
400	1850	865	550	460	368	240	221	185
500	2300	1080	690	575	460	300	276	230

Taratura dei relè magnetici diretti.

Il valore della corrente necessaria a far agire i relè magnetici posti sull'interruttore, in funzione della protezione da corto circuito, dipende dalla potenza dei trasformatori e dal valore della tensione d'esercizio.

Esso deve essere scelto, non solo in funzione della protezione, ma deve essere coordinato con quello che verrà scelto per il funzionamento dei relè magnetici dell'interruttore automatico posto immediatamente a valle del trasformatore, in modo da impedirne l'intervento, quando la sovracorrente sia determinata da guasti avvenuti sulla rete di bassa tensione (vedere a pag. 228).

Inoltre i relè devono avere un certo ritardo di funzionamento, generalmente devoluto al freno fluodinamico, onde impedirne l'intervento quando, nell'inserzione del trasformatore, si determini il richiamo dalla rete, della massima corrente relativa al transitorio di chiusura.

In genere la taratura dei relè magnetici installati sull'interruttore generale di bassa tensione si determina automaticamente, come multiplo della taratura dei relè termici. Il coefficiente di moltiplicazione può essere 5 o 10.

PROTEZIONE DA CORTO CIRCUITO EFFETTUATA CON VALVOLE FUSIBILI

La protezione da corto circuito di un trasformatore, effettuata con valvole fusibili, si differenzia nettamente da quella ottenuta mediante l'inserzione, a monte della macchina, di un interruttore automatico di massima corrente.

Infatti, mentre questo, una volta entrati in funzione i relè, provvede al distacco metallico completo del trasformatore, quando la protezione venga prevista con valvole fusibili, a seconda del tipo di sollecitazione e delle caratteristiche dei vari fusibili, può prodursi la fusione di uno, due, o tre di questi.

Queste possibilità, esclusa naturalmente quella della fusione contemporanea delle tre valvole, può dar luogo a inconvenienti notevoli che possono riflettersi, sia sull'esercizio che sulla sicurezza degli operatori agenti nella cabina.

Quando in conseguenza della sollecitazione dovuta alla sovracorrente, si fonde una delle valvole fusibili, all'impianto alimentato dal trasformatore viene a mancare l'apporto di uno dei conduttori di fase.

I motori in funzione generalmente non si fermano, ma continuano a girare assorbendo, negli avvolgimenti corrispondenti ai conduttori di fase integri, un valore di corrente nettamente superiore alla nominale, quando il motore funziona a pieno carico, in modo che, qualora non sia previsto un salvamotore a monte della macchina, questa rischia di portarsi a temperature pericolose per l'integrità degli isolanti.

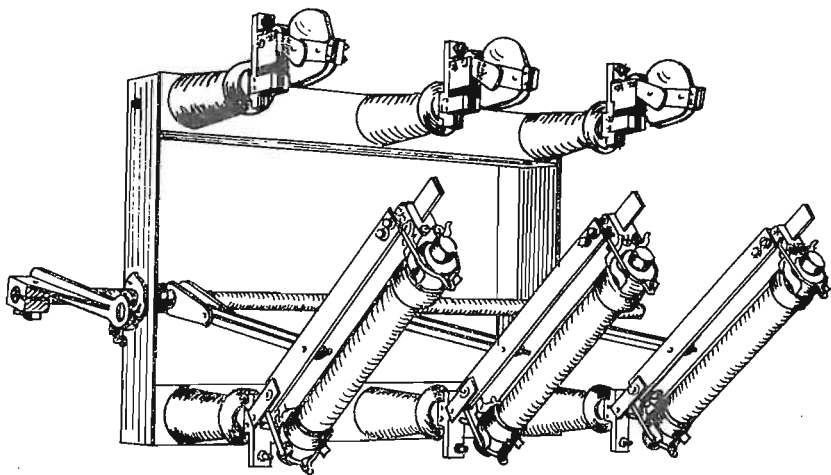



Fig. 104 – Terna di valvole fusibili abbinata a sezionatori manovrabili sottocarico senza possibilità d'apertura automatica.

Quando invece l'intervento avviene su due valvole, sul trasformatore rimane in tensione uno dei conduttori di alimentazione. Questo, nel caso di un'errata interpretazione data dal personale all'accaduto, può portare a notevoli inconvenienti relativi alla integrità fisica degli operatori.

Per tutto quanto abbiamo detto è consigliabile installare, a monte delle valvole fusibili, una terna di sezionatori manovrabili sottocarico, accoppiando le due apparecchiature con un dispositivo meccanico, costruito in modo da provocare l'apertura della terna di sezionamento quando anche una sola delle valvole sia arrivata alla fusione (figure 104-105).

L'apertura della terna, oltre a tutto, renderà sicuro l'intervento degli operatori per il ricambio del fusibile invalidato.

I parametri che occorre determinare per la scelta dei fusibili sono:

— valore della tensione d'esercizio;
— valore di portata della parte meccanica, detta portavalvole;
— valore della corrente di non fusione;
— valore della corrente di fusione;
— eventuale ritardo di funzionamento rispetto all'inizio della sollecitazione;
— capacità d'interruzione;

Valore della tensione d'esercizio.

Nulla di particolare è necessario osservare sul valore della tensione d'esercizio delle valvole fusibili. Occorre, s'intende, che la valvola scelta sia costruita per funzionare, almeno allo stesso valore della tensione prevista per l'alimentazione dell'impianto.

Quando nei listini relativi al tipo di valvola prescelta non esista il valore voluto, è consigliabile adottare il tipo corrispondente all'immediato valore superiore.

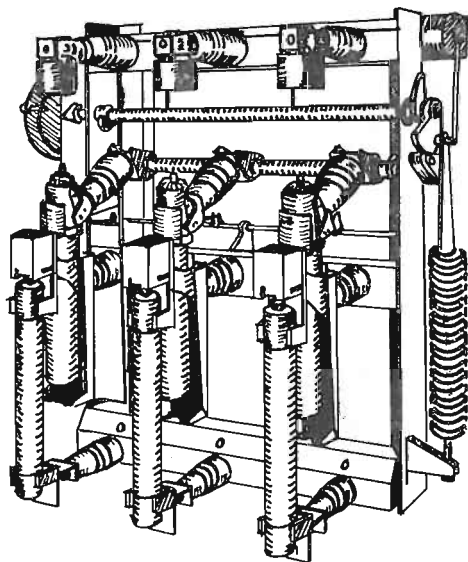



Fig. 105 – Terna di sezionatori manovrabili sottocarico completa di tre valvole fusibili, ad apertura automatica conseguente la fusione anche di una sola valvola. (Magrini).

Portata nominale del portavalvole.

I portavalvole costituiscono l'accessorio necessario per l'inserzione della valvola nel circuito. Il valore di portata in servizio continuo relativo a questa parte dell'apparecchiatura non deve essere inferiore la valore nominale della massima corrente assorbibile dal trasformatore a pieno carico moltiplicato per 1,2.

Valore della corrente di non fusione.

Questo valore è quello massimo che il fusibile può sopportare in modo continuo senza fondere; e rappresenta l'effettivo valore di portata massima ammessa dalla valvola.

Valore della corrente di fusione.

Questo valore corrisponde a quello di taratura dei relè nella protezione effettuata con l'interruttore automatico.

Per la sua determinazione occorre seguire i concetti già da noi esposti a pag. 222.

Eventuale ritardo d'intervento.

Le valvole fusibili vengono costruite generalmente in due diversi tipi nel riguardo del tempo intercorrente fra il determinarsi delle condizioni d'intervento e la fusione.

I tipi sono:

— a fusione rapida;
— a fusione ritardata.

Ogni ditta costruttrice fornisce i diagrammi dei tempi d'intervento in funzione della corrente stabilita, per ogni portata o corrente di non fusione delle valvole.

Quando sia necessario coordinare gli interventi per corto circuito fra la protezione posta sull'alimentazione e quella posta ai morsetti di erogazione del trasformatore, è necessario che il progettista scelga le apparecchiature in modo che le curve d'intervento non siano sovrapponibili.

Nelle figg. 106-107 sono riportate le viste di valvole fusibili per media tensione a grande potenza interruttiva EMP e Magrini.

Potere d'interruzione.

Per il potere d'interruzione delle valvole fusibili valgono le stesse considerazioni svolte per gli interruttori automatici a pag. 215. Nelle tabelle 58-59 sono riportati i valori afferenti alle valvole EMP e Magrini [1].

---

[1] Per maggiori particolari sulla costruzione delle valvole fusibili a media tensione vedere E. Coppi, « *La Tecnica Elettrica* », vol. 2°, Edit. Hoepli.

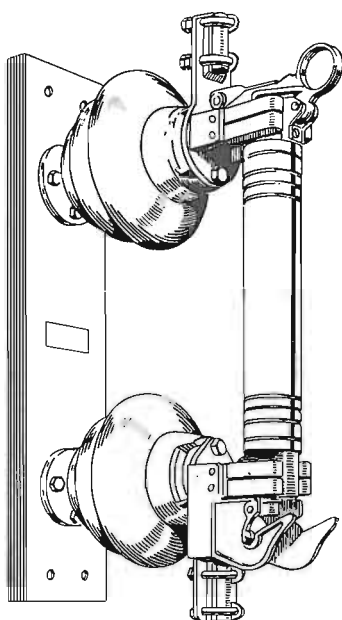



Fig. 106 – Vista esterna di una valvola fusibile EMP per media tensione (Tecnimex).

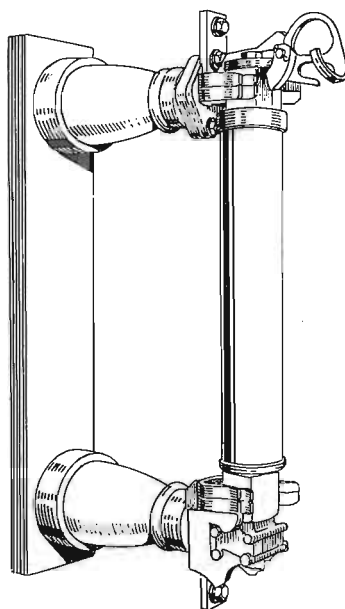



Fig. 107 – Vista esterna di una valvola fusibile BA per media tensione (Magrini).

TABELLA N. 60 – **Caratteristiche elettriche delle valvole EMP.**

Tipi di costruzione V	Portata massima A	Tipi di costruzione V	Capacità di rottura MVA
da 2400 a 4160	400	2400 e 3300	150
da 7500 a 12.000	250	4160 e 6600	250
13.800-15.000-24.000	200	7500-11.000-12.000	350
30.000-34.500	125	13.800-15.000-24.000	500
60.000-69.000	50	30.000-33.000-34.500	750
115.000-138.000	25	60.000-115.000-138.000	1500

TABELLA N. 61 – **Caratteristiche elettriche delle valvole Magrini Serie BA.**

Tipo	Tensione massima nominale kV	Corrente massima nominale A	Corrente di rottura senza condensatore di vapore A
	Valvole con patrone in micarta asportabili a mano		
BA 106	6	100	25.000
BA 115	15	100	20.000
BA 125	25	100	15.000
BA 135	30	100	10.000
	Valvole con patrone in micarta manovrabili a fioretto		
BA 206	6	100	25.000
BA 206	6	200	25.000
BA 215	15	100	20.000
BA 215	15	200	20.000
BA 225	25	100	15.000
BA 225	25	200	15.000
BA 235	30	100	10.000
BA 235	30	200	10.000
	Valvole con patrone in porcellana manovrabili a fioretto		
BA 206	6	100	25.000
BA 206	6	200	25.000
BA 215	15	100	20.000
BA 215	15	200	20.000
BA 225	20	100	10.000
BA 225	20	200	10.000
BA 235	30	100	10.000
BA 235	30	200	10.000

PROTEZIONE DA CORTO CIRCUITO E DA SOVRACCARICO EFFETTUATA SULLA PARTE A BASSA TENSIONE MEDIANTE INTERRUTTORE AUTOMATICO, IN FUNZIONE DI INTERRUTTORE GENERALE

Quando il progettista ritenga necessario ricorrere a questa disposizione schematica, specialmente consigliabile quando nella cabina sono installate più macchine costituenti un banco di parallelo, per ogni macchina dovrà prevedersi un interruttore automatico di massima corrente con relè magnetotermici, il quale oltre ad assicurare la protezione da sovraccarico e da corto circuito del trasformatore posto immediatamente a monte, ne permetterà il sezionamento dal banco quando si rendano necessari eventuali interventi per manutenzione.

Sull'interruttore è opportuno venga prevista la bobina di apertura, affidando la chiusura del circuito di questo apparecchio, a un contatto ausiliario posto sull'albero di comando della terna di sezionatori che, secondo le Norme CEI, deve essere installata immediatamente a monte di ogni trasformatore, nell'eventualità di banchi di parallelo, o di più unità alimentate da un unico interruttore a media tensione (fig. 108).

Il contatto dovrà risultare chiuso a sezionatori aperti e viceversa, in modo che, automaticamente, l'apertura dei sezionatori posti sulla parte a media tensione, provochi l'apertura dell'interruttore posto sulla bassa tensione, con il conseguente completo sezionamento metallico della macchina.

Le Norme CEI impongono inoltre, qualora l'interruttore non sia onnipolare e il funzionamento dell'impianto si avvalga anche del conduttore neutro, che venga predisposto un sezionatore manovrabile a mano, inserito su questo conduttore, da aprire subito dopo che sia avvenuto il distacco metallico dei conduttori di fase, in modo che, a manovra eseguita, non esista alcuna connessione metallica con l'impianto.

I parametri relativi all'interruttore che il progettista deve determinare sono i seguenti:

— tensione nominale;
— portata in servizio continuo;
— potere d'interruzione;
— fattore di potenza al quale corrisponde il potere interruttivo;
— taratura dei relè termici;
— taratura dei relè magnetici;

— eventuale taratura del ritardatore di funzionamento dei relè magnetici, quando l'impianto venga previsto con protezioni selettive.

Tensione nominale.

Il valore della tensione nominale di funzionamento dell'interruttore deve essere sempre superiore a quello della tensione d'esercizio, in genere gli interruttori reperibili sul mercato hanno una tensione nominale di 500 V e sono usabili su tensioni d'esercizio fino a 400 V.

Portata in servizio continuo.

La portata in servizio continuo dell'interruttore è consigliabile venga scelta maggiorata, rispetto al valore della corrente nominale del trasformatore, in modo che sia agevole far agire il trasformatore entro i limiti di sovraccarico ritenuti utili per un razionale sfruttamento della macchina.

Ogni buon costruttore è in grado di fornire i certificati di prova del tipo d'interruttore che il progettista ritiene sia adatto ai compiti che deve svolgere. In essi sono facilmente reperibili i dati relativi alle sovratemperature che l'interruttore ha raggiunto durante la prova di portata subita nel collaudo.

Qualora i certificati di prova non esistessero, è consigliabile che il dato della portata nominale venga scelto dal progettista in modo molto cautelativo.

Potere d'interruzione.

Il valore della corrente di corto circuito che un trasformatore può erogare ai morsetti secondari, supponendo che venga alimentato da una rete che praticamente disponga di una potenza infinita, dipende dal valore della potenza nominale della macchina, dal valore della tensione secondaria e da quello della tensione di corto circuito.

Nella tabella 62, per trasformatori costruiti secondo il capitolato ANIDEL, abbiamo riunito, per le tensioni nominali di 230-290 e 400 V, i valori calcolati delle correnti di corto circuito, mentre nella tabella 62 *a* abbiamo riportato il valore del fattore di potenza corrispondente, in relazione alla classe d'isolamento.

Per trasformatori di costruzione diversa da quella considerata, forniamo le relazioni che permettono di calcolare il valore del fattore di potenza di corto circuito.

TABELLA N. 62 – **Valori della corrente di corto circuito simmetrico per trasformatori costruiti secondo il capitolato ANIDEL (V_{cc} = 4,2%).**

Potenza nominale (kVA)	Tensione nominale secondaria (volt)		
	230 (A)	290 (A)	400 (A)
100	6000	4750	3440
160	9600	7500	5500
200	12000	9500	6880
315	18900	14950	10850
400	24000	19000	13760
500	30000	23750	17200

TABELLA N. 62 *a* – **Valori del fattore di potenza di corto circuito per trasformatori costruiti secondo il capitolato ANIDEL, in funzione della potenza nominale e della classe d'isolamento.**

Potenza nominale (kVA)	Classe d'isolamento (kV)		
	10	20	30
100	0,34	0,38	0,41
160	0,31	0,34	0,37
200	0,29	0,32	0,35
250	0,28	0,31	0,33
315	0,26	0,29	0,31
400	0,25	0,27	0,29
500	0,23	0,26	0,28

Esse sono le seguenti:

$$P_{cc} = \sqrt{3} \cdot \frac{V_{cc}\%}{100} \cdot I_n \cdot V_n = VA_{cc}$$

$$\cos \varphi_{cc} = \frac{W_{cc}}{VA_{cc}}$$

nelle quali i simboli hanno questo significato:

P_{cc} = potenza apparente di corto circuito espressa in VA;
$\sqrt{3}$ = fattore di fase del sistema trifase;
$V_{cc}\%$ = tensione percentuale di corto circuito;
I_n = corrente nominale primaria o secondaria;
V_n = tensione nominale primaria o secondaria;
$\cos \varphi_{cc}$ = valore del fattore di potenza di corto circuito;
W_{cc} = valore delle perdite misurate sul trasformatore nella prova in corto circuito (perdite nel rame).

Come è possibile rilevare dalla tabella 62 i valori che può assumere la corrente di corto circuito sono rilevanti, in special modo quando nella cabina venga previsto un banco di parallelo di più macchine, in quanto, in questo caso, il valore totale risulta dalla somma di quelli relativi alle macchine contemporaneamente in funzione.

Nella scelta dell'interruttore è necessario che il valore del potere interruttivo, denunciato dal fabbricante e espresso nella targa, copra il valore massimo ottenuto dal calcolo, e che il fattore di potenza al quale si riferiscono i documenti di collaudo non sia superiore a 0,2.

Nelle tabelle 63-64-65-66-67-68 abbiamo riportato i valori caratteristici dei normali interruttori più in uso.

Quando il valore totale della corrente di corto circuito supera quello relativo al potere d'interruzione dell'interruttore, e assolutamente necessario interporre fra questo e il trasformatore una terna di valvole fusibili ad alta capacità d'interruzione, di portata adeguata al valore nominale della corrente secondaria, in funzione di protezione da corto circuito, invalidando nell'interruttore i relè magnetici a intervento istantaneo.

Qualche casa costruttrice, come la SACE, ha realizzato un connubio fra interruttore automatico e valvole fusibili (fig. 113) mediante il quale è possibile che l'interruttore funzioni fino al limite della propria

potenza d'interruzione, mentre per correnti superiori, intervengono i fusibili incorporati, i quali una volta avvenuto il funzionamento, anche di un solo elemento, provvedono all'apertura dell'interruttore.

Nella tabella 68 sono riportate le caratteristiche dell'interruttore SACE tipo FZ 630/500.

TABELLA N. 63 – **Caratteristiche funzionali dell'interruttore SACE tipo Z 63** (fig. 109).

Caratteristiche elettriche:

Tensione nominale		500 V
Corrente nominale		63 A
Potere d'interruzione simmetrico	a 500 V	8 kA
	a 380 V	9 kA
	a 220 V	10 kA

Caratteristiche di relè:

Massima corrente continuativa ammissibile (A)	Regolazione relè termici (A)	Regolazione relè magnetici (A)
2,5	2÷2,5	25
3,2	2,5÷3,2	32
4	3,2÷4	40
5	4÷5	50
6,3	5÷6,3	63
8	6,3÷8	80
10	8÷10	100
12,5	10÷12,5	125
16	12,5÷16	160
20	16÷20	200
25	20÷25	250
32	25÷32	320
40	32÷40	400
50	40÷50	500
63	50÷63	630

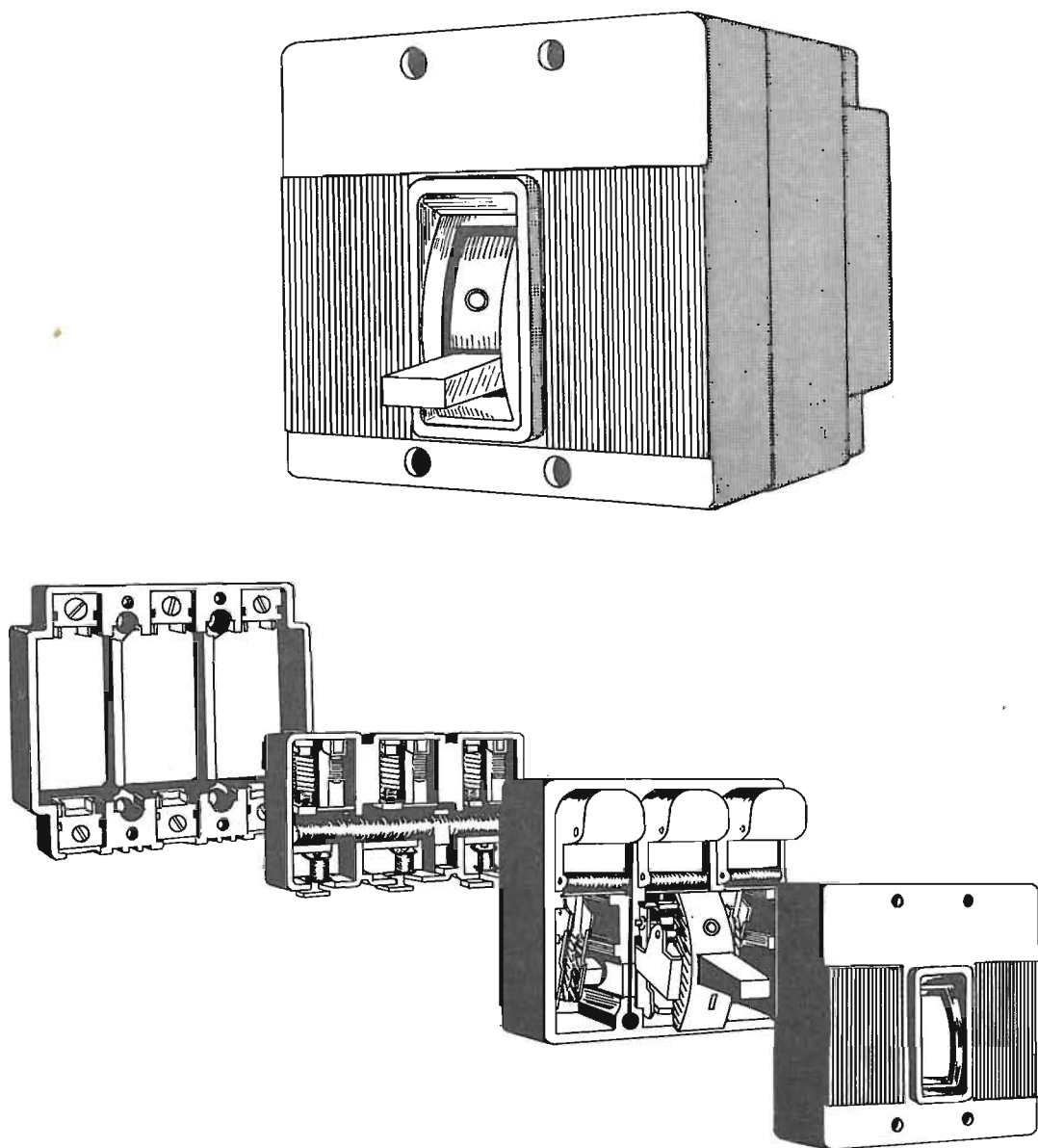



Fig. 109 – Vista esterna e parti principali componenti l'interruttore SACE Z63.

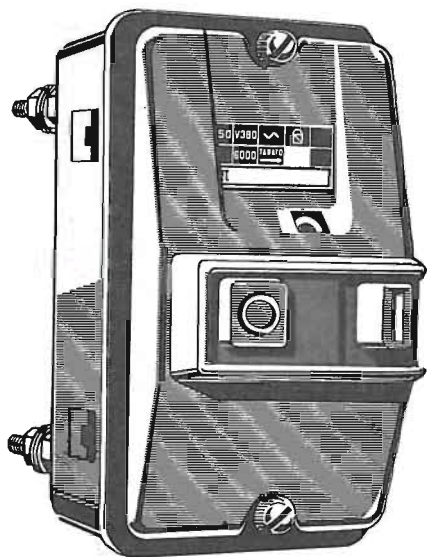
TABELLA N. 64 – **Caratteristiche funzionali dell'interruttore Ticino tipo 1663 N** (fig. 109 *a*).

Tensione nominale	380 V
Corrente nominale	50 A
Potere d'interruzione simmetrico a 380 V	6 kA

Fig. 109 *a* – Vista esterna dell'interruttore automatico Ticino tipo 1663 N.

Caratteristiche dei relè:

Massima corrente continuativa ammissibile (A)	Taratura relè termici (A)	Taratura relè magnetici (A)
35,5	37,5	225
38,0	40,0	240
40,5	42,5	255
43,0	45,0	270
45,5	47,5	285
48,0	50,0	300

TABELLA N. 65 – **Caratteristiche funzionali dell'interruttore SACE Z 160** (fig. 110).

Caratteristiche elettriche:

Tensione nominale	500 V
Corrente nominale	160 A
Potere d'interruzione simmetrico a 500 V	10 kA
a 380 V	12 kA
a 220 V	15 kA

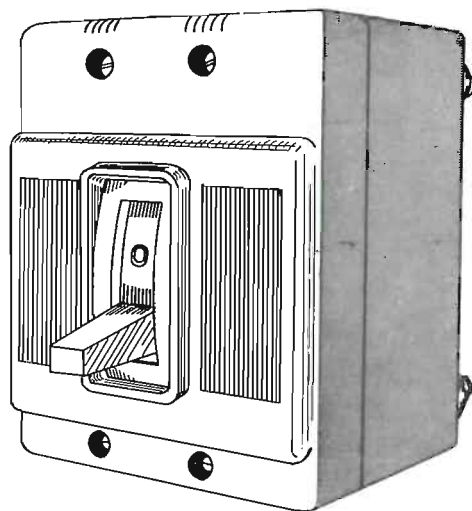



Fig. 110 – Vista esterna dell'interruttore SACE Z 160.

Caratteristiche dei relè:

Massima corrente continuativa ammissibile (A)	Regolazione relè termici (A)	Regolazione relè magnetici (A)
6	4,5÷6	50
8	6÷8	60
11	8÷11	75
15	10÷15	100
22	15÷22	150
35	25÷53	250
50	35÷50	300
70	50÷70	500
95	70÷95	750
125	95÷125	1000
150	125÷150	1000
160	160	1000

TABELLA N. 66 – **Caratteristiche funzionali dell'interruttore SACE Z 320** (fig. 111).

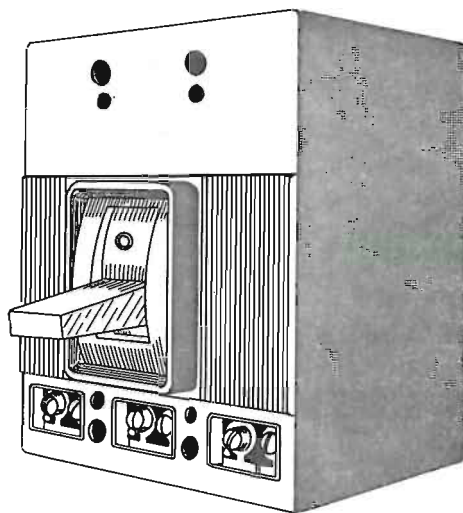



Fig. 111 – Vista esterna dell'interruttore SACE Z 320.

Caratteristiche elettriche:

Tensione nominale		500 V
Corrente nominale		320 A
Potere d'interruzione simmetrico	a 500 V	15 kA
	a 380 V	20 kA
	a 220 V	25 kA

Caratteristiche dei relè:

Massima corrente continuativa ammissibile (A)	Regolazione relè termici (A)	Regolazione relè magnetici (A)
80	63÷80	400÷800
100	80÷100	500÷1000
125	100÷125	625÷1250
160	125÷160	800÷1600
200	160÷200	1000÷2000
250	200÷250	1250÷2500
280	250÷280	1400÷2800
320	280÷320	1600÷3200

TABELLA N. 67 – **Caratteristiche funzionali dell'interruttore Vanossi tipo RA** (fig. 112).

Caratteristiche elettriche:

Tensione nominale 500 V
Corrente nominale 400 A
Potere d'interruzione simmetrico a 500 V 20 kA

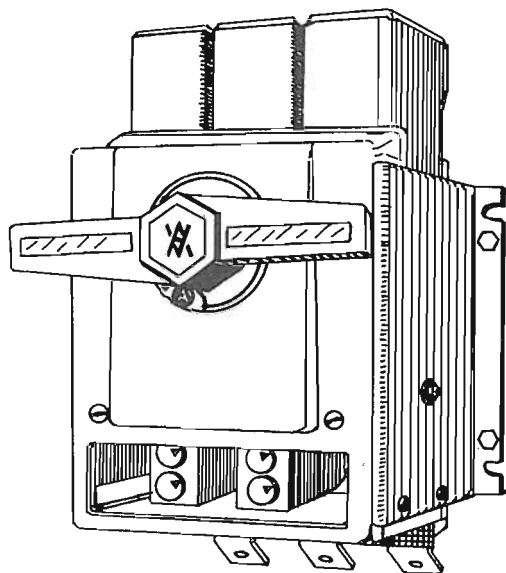
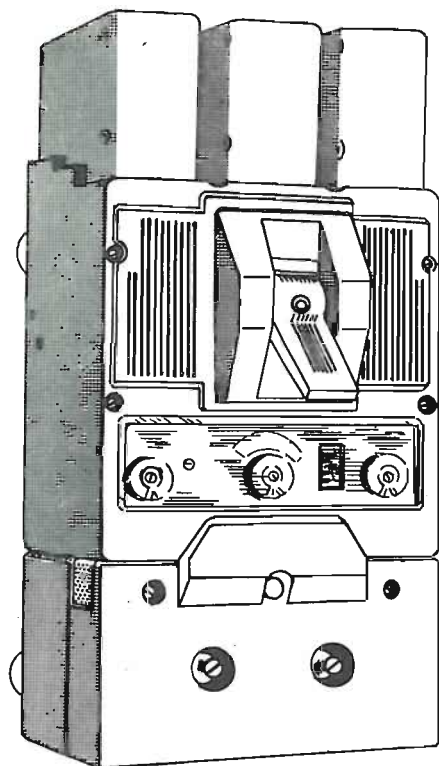



Fig. 112 – Vista esterna di un interruttore automatico per bassa tensione Vanossi tipo RA.

Caratteristiche dei relè:

Massima corrente continuativa ammissibile (A)	Regolazione relè termici (A)	Regolazione relè magnetici (A)
40	25÷40	125÷250
50	30÷50	150÷300
65	45÷65	200÷400
80	50÷80	250÷500
100	60÷100	300÷600
130	80÷130	400÷800
160	100÷160	500÷1000
200	125÷200	625÷1250
250	150÷250	750÷1500
320	200÷320	1000÷2000
400	250÷400	1250÷2500

TABELLA N. 68 – **Caratteristiche funzionali degli interruttori SACE tipo FZ 630/400-500** (fig. 113).

Caratteristiche elettriche:

Tensione nominale	500 V
Corrente nominale	400-500 A
Potere d'interruzione simmetrico a 500 V	100 kA

Fig. 113 – Vista esterna dell'interruttore SACE tipo FZ 630/500.

Caratteristiche dei relè:

Interruttore tipo	Massima corrente continuativa ammissibile A	Taratura relè	
		Termici A	Magnetici A
FZ 630/400	125	100÷125	625÷1250
	160	125÷160	800÷1600
	200	160÷200	1000÷2000
	250	200÷250	1250÷2500
	320	250÷320	1600÷3200
	400	320÷400	1600÷3200
FZ 630/500	500	400÷500	2000÷3500

TABELLA N. 69 – **Caratteristiche funzionali degli interruttori SACE tipo P_1 P_2 P_3** (fig. 114).

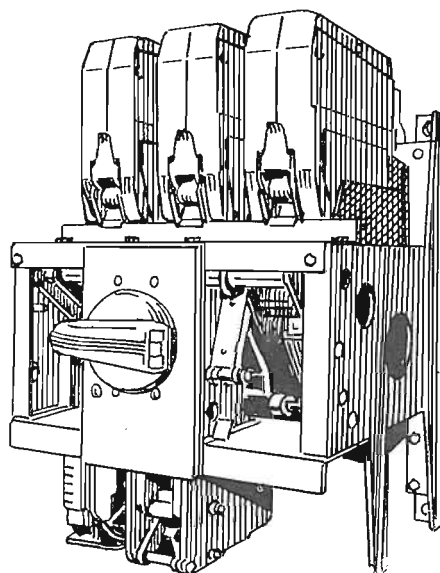



Fig. 114 – Vista esterna dell'interruttore SACE tipo P.

Caratteristiche elettriche:

Interruttore tipo		Corrente nominale A	Tensione nominale V	Potere d'interruzione simmetrico (kA)		
				500 V	380 V	220 V
P_1	800	800	500	30	32	35
	1250	1250		30	32	35
	1600	1600		32	35	37
	2000	2000		32	35	37
P_2	800	800	500	50	52	55
	1250	1250		50	52	55
	1600	1600		52	55	57
	2000	2000		52	55	57
	3000	3000		55	57	60
	4000	4000		55	57	60
P_3	1600	1600	500	75	75	80
	2000	2000		75	75	80
	3000	3000		100	100	110
	4000	4000		100	100	110

TARATURA DEL DISPOSITIVO DEL RITARDO DEL FUNZIONAMENTO DEI RELÈ QUANDO NELL'IMPIANTO SI REALIZZINO PROTEZIONI SELETTIVE

Abbiamo accennato a questo problema parlando del coordinamento di taratura fra l'interruttore posto sulla media tensione e quello posto sulla bassa.

Non è questo, dato l'argomento ristretto del volume, il campo per una vasta disanima sulle protezioni selettive, ma pensiamo di far cosa gradita ai nostri lettori accennare e tratteggiare brevemente il problema.

Si può definire « selettiva » la protezione, riferita alle varie parti componenti un impianto elettrico, quando i tempi totali di interruzione propri dei singoli apparecchi, installati in serie, sono graduati in modo tale che, nell'eventualità del guasto, intervenga sempre e unicamente l'apparecchio spazialmente più vicino a questo.

Il tempo totale d'intervento di un apparecchio è composto della somma di tre intervalli di tempo distinti:

— tempo proprio d'intervento del relè (t_r);

— tempo d'intervento del meccanismo dell'interruttore fino al distacco dei contatti (t_i);

— tempo di durata dell'arco fino allo spegnimento (t_a);

è evidente che per ottenere una protezione selettiva occorre, distinguendo con A l'interruttore o l'apparecchio installato all'ultimo posto della serie, che il tempo totale d'intervento di B, interruttore posto immediatamente a monte di questo, sia maggiorato di un intervallo di tempo dimensionato in modo che, il nuovo intervallo, fra il prodursi del guasto l'intervento di B sia tale da escluderne l'apertura ($t_r + t_i + t_a \dots + t_x$)

Nella figura 115 è riportato lo schema di un impianto comprendente quattro punti d'interruzione e i tempi d'intervento crescenti da valle a monte necessari per ottenere una protezione selettiva.

Evidentemente occorre dosare i tempi in modo da non sottoporre l'impianto ad eccessive sollecitazioni termiche e dinamiche conseguenti il corto circuito. In genere sarà opportuno osservare i seguenti presupposti fondamentali:

— qualunque sia la posizione degli apparecchi essi devono essere in grado di stabilire, sopportare per il tempo richiesto, e interrompere, il valore massimo della corrente di corto circuito possibile nel punto d'installazione;

— i tempi d'intervento degli interruttori devono essere crescenti di mano in mano che dall'ultimo gradino, si risale verso il primo e cioè a quello più vicino al punto di consegna dell'energia;

— l'apparecchio dell'ultimo gradino deve agire nel più breve intervallo di tempo possibile, onde evitare ritardi eccessivi nell'intervento degli altri.

— l'impianto deve essere dimensionato in modo da sopportare, senza danno, le sollecitazioni termiche ed elettrodinamiche conseguenti i ritardi d'intervento degli apparecchi di protezione; nella tabella 70 sono stati riportati i valori delle correnti di corto circuito che i cavi sono adatti a sopportare in funzione della sezione e del tempo di durata della sollecitazione;

— la scelta dei relè istantanei o ritardati deve essere condotta in modo da conciliare le opposte esigenze di non provocare aperture intempestive o di non determinare un'eccessiva sollecitazione termica nell'impianto;

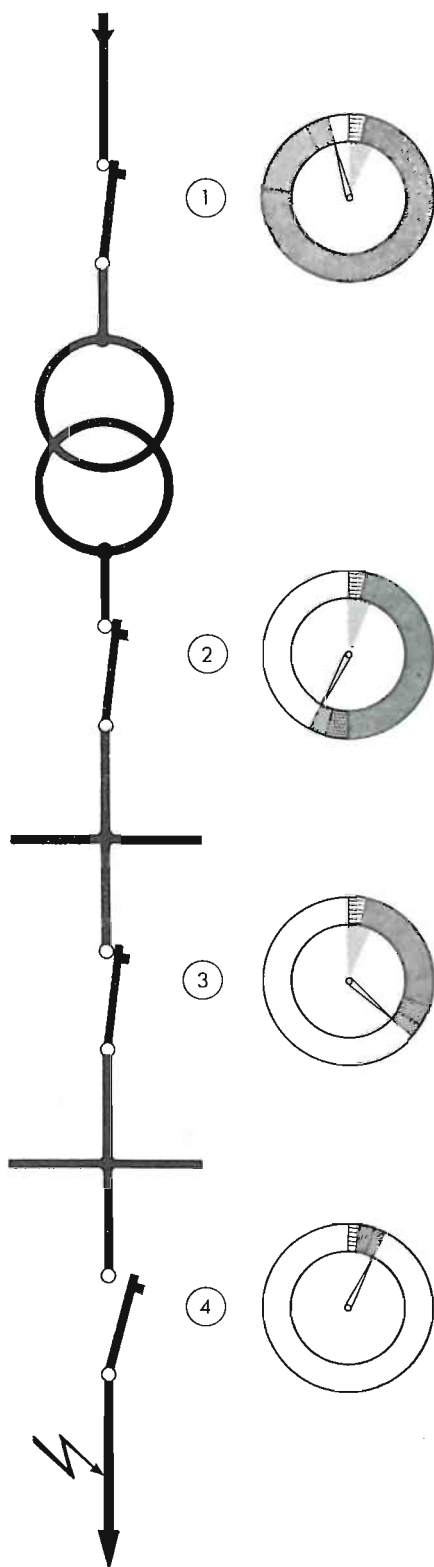



Fig. 115.

Schema d'impianto con protezioni selettive e indicazione dei tempi d'intervento dei relè.

TABELLA N. 70 – **Sezioni ammissibili dei cavi in funzione delle correnti di corto circuito e della loro durata.**

Corrente di corto circuito asimmetrica (1,25 corrente di corto circuito simmetrica)	Durata della corrente di corto circuito (cicli)		
	1,5÷2	12,5	25
5 000	10 mm²	25 mm²	40 mm²
10 000	16 »	40 »	63 »
15 000	25 »	63 »	100 »
25 000	40 »	100 »	150 »
35 000	40 »	160 »	200 »
50 000	63 »	200 »	300 »
75 000	160 »	300 »	400 »
100 000	160 »	400 »	500 »

TABELLA N. 71 – **Valori significativi della protezione selettiva illustrata nella figura 117.**

Interruttore N°	Tipo	Corrente nominale A	Taratura				Tempo di apertura effettivo sec
			Corrente di intervento		Ritardo a tempo indipendente		
			su sovracc. A	istantaneo A	lungo sec	breve sec	
1	P 2	2000	2000	7500	20	0,4	0,44
2	P 2	1250	1500	4000	10	0,25	0,305
3	Z 630	630	300	800	termico	0,07	0,085
4	Z 160	160	70	300	termico	—	0,015

— i massimi tempi di ritardo non possono superare 0,4 secondi, ed è opportuno che, tra un gradino e quello successivo, venga lasciato un intervallo minimo di 0,05÷0,1 secondi. Quest'ultima considerazione limita il numero degli apparecchi in serie da 4 a 5 per evidenti ragioni.

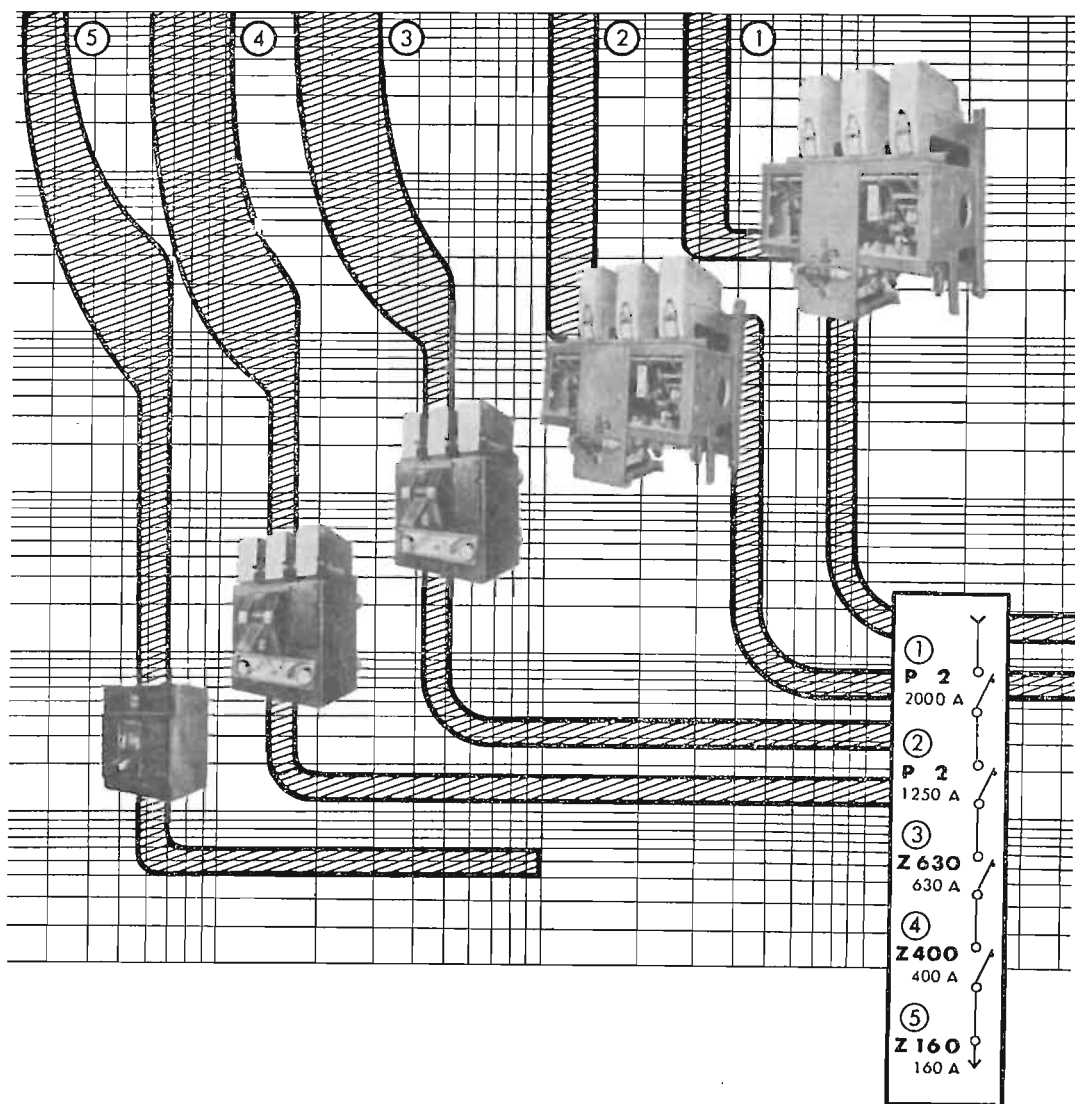



Fig. 116 – Curve caratteristiche tempo-corrente in una protezione selettiva.

Nella fig. 116 in riferimento a vari tipi d'interruttori prodotti dalla SACE abbiamo riportato le curve caratteristiche tempo-corrente di intervento degli apparecchi rappresentati e uno schema di connessione.

Nella figura 117 è rappresentato uno schema di protezione selettiva, con l'indicazione delle correnti di corto circuito possibili nei vari punti, e gli oscillogrammi relativi al funzionamento.

Nella tabella 71 sono riportati i valori significativi della protezione.

Per facilitare ai lettori il calcolo del valore della corrente di corto circuito nei vari punti dell'impianto riportiamo le tabelle 72-73-74, nelle quali sono indicate, per le varie sezioni, le lunghezze di cavo necessarie per ridurre il valore della corrente di corto circuito dal valore di partenza a quello indicato nella tabella.

A puro titolo informativo riteniamo opportuno precisare che al valore della corrente di corto circuito calcolata, o rilevata dalle tabelle, nei nodi di derivazione, quando gli utilizzatori siano costituiti da motori asincroni, è necessario aggiungere l'apporto dato da questi.

Per ogni motore, che nel primo istante del corto circuito funziona da generatore, è necessario calcolare un apporto di corrente grosso modo pari al valore della corrente di avviamento diretto, relativo al motore considerato.

TABELLA N. 72 – **Lunghezze dei cavi (in metri), in funzione della sezione, necessarie per ridurre la corrente di corto circuito da kA a kA_1 nei circuiti a 500 V 50 p/s.**

da kA	25	25	50	50	50	100	100	100	100
a kA_1	5	15	5	15	25	5	15	25	50
Sezione mm²	Lunghezza m								
1,6	5,00	1,65	5,15	2,65	1,60	5,30	2,20	1,50	0,90
2,5	10,60	2,60	10,80	3,40	2,00	11,00	3,10	1,90	1,00
4	16,40	4,10	16,60	5,30	2,80	16,80	5,20	3,20	1,40
6,3	25,40	6,40	25,90	8,70	4,20	26,20	8,20	4,80	2,10
10	41,00	10,10	42,60	13,60	6,60	42,90	13,70	7,90	3,30
16	60,90	14,80	64,40	20,70	9,90	65,50	20,00	12,00	5,80
25	97,50	21,8	102,00	31,10	14,90	102,80	30,80	17,70	7,50
40	144,20	32,10	153,40	45,30	21,90	155,00	42,00	26,30	11,00
63	210,00	42,70	221,80	64,20	29,50	226,90	66,60	37,50	14,80
100	279,00	53,40	306,80	84,30	37,80	316,3	90,80	50,30	18,90
160	345,00	66,50	387,00	107,20	49,20	398,00	115,00	65,10	25,80

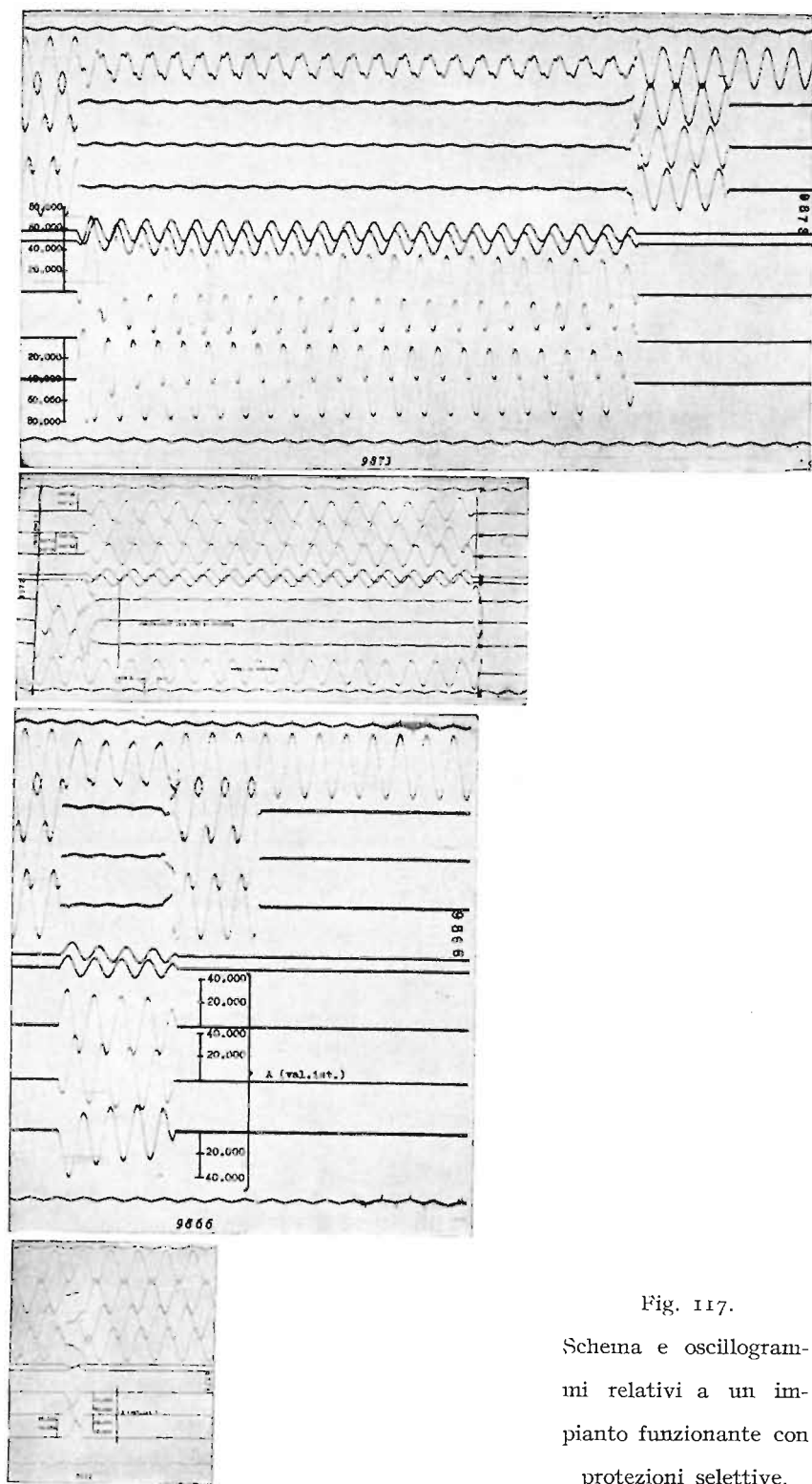
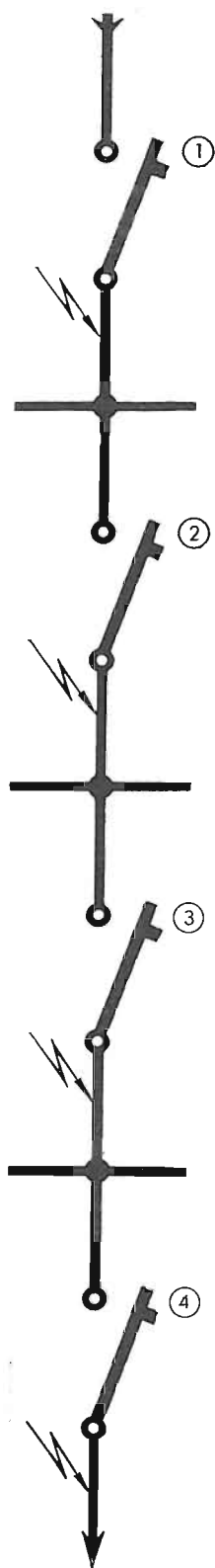



Fig. 117.
Schema e oscillogrammi relativi a un impianto funzionante con protezioni selettive.

TABELLA N. 73 – **Lunghezze dei cavi (in metri), in funzione della sezione, necessarie per ridurre la corrente di corto circuito da kA a kA₁, nei circuiti a 220 V, 50 p/s.**

da kA	25	25	25	50	50	50	100	100	100
a kA_1	5	15	5	15	25	5	15	25	50
Sezione mm²	Lunghezza m								
1,6	1,95	0,70	2,10	1,15	0,70	2,15	0,90	0,60	0,40
2,5	4,30	1,10	4,40	1,40	0,80	4,50	1,25	0,75	0,45
4	6,60	1,70	6,80	2,20	1,15	6,80	2,10	1,30	0,55
6,3	10,60	2,60	10,50	3,60	1,70	10,60	3,30	1,95	0,85
10	16,60	4,10	17,30	5,50	2,70	17,40	5,60	3,20	1,35
16	25,00	6,00	26,50	8,50	4,00	26,50	8,00	4,90	2,00
25	39,50	8,90	41,30	12,60	6,10	41,60	12,50	7,20	3,10
40	58,40	13,00	62,20	13,40	8,90	62,80	17,40	10,70	4,50
63	85,00	17,30	90,50	26,00	11,90	91,70	27,00	15,20	6,00
100	113,00	21,60	124,30	34,10	15,30	128,20	36,80	20,40	7,70
160	140,00	27,00	157,00	43,00	20,00	170,50	46,50	26,00	10,00

TABELLA N. 74 – **Lunghezze dei cavi (in metri), in funzione della sezione, necessarie per ridurre la corrente di corto circuito da kA a kA₁, nei circuiti a 380 V, 50 p/s.**

da kA	25	25	50	50	50	100	100	100	100
a kA_1	5	15	5	15	25	5	15	25	50
Sezione mm²	Lunghezza m								
1,6	4,00	1,30	4,20	2,20	1,30	4,25	1,70	1,20	0,70
2,5	8,50	2,10	8,70	2,70	1,60	8,80	2,50	1,50	0,80
4	13,10	3,30	13,30	4,25	2,20	13,40	4,15	2,60	1,10
6,3	20,30	5,10	20,70	6,90	3,40	20,90	6,60	3,80	1,70
10	32,8	8,10	34,10	10,80	5,30	34,30	10,90	6,30	2,60
16	48,70	11,80	51,40	16,00	7,80	51,80	15,80	9,50	3,90
25	78,00	17,40	81,50	24,80	11,90	82,10	24,60	14,10	6,00
40	115,20	25,60	122,70	36,20	17,50	123,80	34,30	21,10	8,80
63	167,80	34,20	177,10	51,40	23,60	151,50	53,30	29,90	11,80
100	223,00	42,60	245,20	67,40	30,30	253,30	72,60	40,20	15,10
160	276,00	52,90	308,00	85,00	377,90	318,50	91,00	51,00	20,00

PROTEZIONE DA SOVRACCARICO

La protezione da sovraccarico di un trasformatore deve essere in grado di intervenire quando la macchina venga sottoposta, per un certo tempo, ad un carico maggiore di quello permesso dal valore nominale della corrente secondaria.

Nelle cabine di trasformazione insite in impianti industriali, nelle quali, generalmente, le macchine sono largamente dimensionate rispetto alla prestazione a loro richiesta, il problema si risolve tarando i relè termici posti sull'interruttore generale di bassa tensione, in modo che determinino l'apertura dell'apparecchio dopo un certo tempo (60÷120 secondi) che la corrente erogata abbia oltrepassato il 110% del valore nominale.

Nelle tabelle 64-65-66-67-68-69 riguardanti gli interruttori automatici di massima corrente adatti per l'installazione sulla bassa tensione, sono riportate, per ogni tipo, le tarature permesse dai relè.

La protezione da sovraccarico effettuata mediante valvole fusibili è da evitare in quanto, questi apparecchi, costretti a lavorare molto vicini alla corrente di fusione, sprecano una quantità non indifferente di energia che si trasforma in calore diminuendo il rendimento della macchina.

Visto il problema in questo senso la soluzione appare molto semplice, in quanto non si ritiene, generalmente opportuno, far lavorare il trasformatore al limite della prestazione possibile, anche quando la temperatura ambiente ha un valore medio nettamente inferiore a 40 °C, che, come il lettore ricorderà, è quello ammesso come massimo dalle Norme CEI per determinare le sovratemperature raggiunte a regime dagli elementi componenti il trasformatore.

D'altra parte il maggior rendimento del trasformatore si ottiene dal 50 al 60% del carico massimo (vedere tabella 35 a pag. 111) dopo di che il rendimento diminuisce in modo notevole, mentre aumentano, di conseguenza, le perdite d'energia insite nella trasformazione.

Possono però riscontrarsi casi nei quali in via eccezionale o nettamente transitoria, si ritiene conveniente sovraccaricare il trasformatore sfruttandone razionalmente la potenza.

In genere questa necessità si riscontra nelle cabine comprese nelle reti di distribuzione.

Concetti, schemi e criteri di calcolo, atti alla determinazione dei parametri per la protezione da sovraccarico dei trasformatori installati nelle cabine di distribuzione

Le cabine inserite in una rete di distribuzione si differenziano nettamente da quelle costruite per l'alimentazione di stabilimenti industriali, sia per i compiti ad esse devoluti, sia come concetto di dimensionamento delle macchine, come il lettore avrà potuto rendersi conto, dalla breve esposizione che è stata fatta a pag. 126.

In teoria il valore della potenza nominale del trasformatore da prevedere in una cabina di trasformazione facente parte di una rete di distribuzione, dovrebbe essere dimensionato in modo da svolgere il proprio compito in corrispondenza della massima punta di assorbimento degli utenti.

Questo concetto è valido per le cabine che servono prevalentemente zone industriali, nelle quali il carico, durante il normale ciclo lavorativo, si mantiene abbastanza costante con punte invernali che si discostano di poco da quelle delle altre stagioni, in quanto anche la contemporaneità fra il carico di forza motrice e il carico per l'illuminazione non assume, che eccezionalmente, valori determinanti.

Nelle cabine che servono zone miste, residenziali e industriali, la punta invernale del carico, supera, in molti casi, del 60÷70%, la punta normale e nel caso si dovesse seguire il criterio ritenuto valido per le cabine costruite nelle zone industriali, una gran parte della potenza del trasformatore rimarrebbe inutilizzata circa nove mesi all'anno.

In genere il maggior assorbimento, dovuto alla sovrapposizione del carico per illuminazione e per forza motrice, si registra nei mesi di novembre, dicembre e gennaio ed è limitato a un periodo di tempo che difficilmente supera le due ore, una volta ogni 24 ore.

Dato che il fenomeno si sviluppa nei mesi più freddi e quindi nella stagione più favorevole per il raffreddamento dei trasformatori, è da ritenersi sia conveniente sfruttare la naturale diminuzione della temperatura ambiente, che assume certamente un valore molto minore di quello massimo ammesso dalle Norme CEI, sovraccaricando la macchina in modo che, pur superando la punta di massima richiesta, non venga danneggiata dall'assunzione, negli avvolgimenti, di temperature pericolose per l'integrità degli isolanti.

Comportamento dei trasformatori durante i transitori di carico, e i problemi relativi al sovraccarico

Facendo astrazione dai trasformatori isolati in aria, per i quali non si sono potute formulare leggi attendibili che ne definiscano con precisione il comportamento durante i transitori termici, per le macchine isolate in olio queste leggi sono note con sufficiente approssimazione, in modo che diviene possibile conoscere il loro comportamento senza ricorrere a prove termiche che esulino da quelle necessarie per determinarne i parametri essenziali, nelle condizioni di regime termico a carico nominale.

Si è potuto così approntare un metodo grafico che permette di arrivare alla soluzione del problema con rapidità e precisione.

Prima di descrivere il metodo pensiamo sia utile esporre rapidamente le equazioni generali che regolano i fenomeni termici nei trasformatori.

Costante di tempo termica.

La relazione che esprime il valore della costante di tempo termica, calcolata in base alle caratteristiche del trasformatore è:

$$T_r = \frac{C \cdot \theta_c}{P_c}$$

nella quale C è il valore della capacità termica del trasformatore, θ_c è il valore della sovratemperatura dell'olio sull'ambiente a carico nominale, e P_c è la potenza calorifica generata a carico nominale.

La potenza colorifica trasmessa si ritiene proporzionale alla potenza $\frac{1}{n}$ della sovratemperatura quindi

$$P = \lambda \theta^{\frac{1}{n}}$$

e il valore del riscaldamento, in funzione del tempo, per tutto il periodo di riscaldamento o di raffreddamento è ricavabile dalla relazione

$$\frac{t}{T_r} = \int_{\frac{\theta_i}{\theta_c}}^{\frac{\theta}{\theta_c}} \frac{\dfrac{d\,\theta}{\theta_c}}{\left(\dfrac{\theta_f}{\theta_c}\right)^{\frac{1}{n}} - \left(\dfrac{\theta}{\theta_c}\right)^{\frac{1}{n}}}$$

e in particolare se $\frac{\theta_f}{\theta_c}$ è uguale a zero e $n = 0{,}8$ si ha

$$\theta = \frac{\theta_c}{\left(1 + \frac{t}{4\,T_r}\right)^4}$$

Capacità termica.

La relazione con la quale si perviene a determinare in modo convenzionale il valore della capacità termica dei trasformatori è

$C = 0{,}125$ peso avvolgimento e nucleo $+ 0{,}0855$ peso cassone e radiatori $+ 0{,}39$ peso olio.

I pesi sono espressi in chilogrammi e la capacità termica è espressa in Wh/°C.

Il calore specifico dei diversi materiali costituenti il trasformatore è

— rame 0,11 Wh/°C kg
— acciaio 0,12 » » »
— olio minerale 0,56 » » »

Riscaldamento dell'olio.

Il riscaldamento finale dell'olio, con un carico qualsiasi, in funzione del suo riscaldamento per il carico nominale è dato dalla relazione

$$\theta_f = \theta_c \left(\frac{R \cdot K^2 + 1}{R + 1}\right)^n$$

Variazione del gradiente nel punto più caldo in funzione del carico.

$$\theta_{gx} = \theta_g\, K^{1,6}$$

con

$$\theta_g = \theta_{cm} + 10 - \theta_c$$

Calcolo del carico massimo che un trasformatore può sopportare senza che il punto più caldo degli avvolgimenti superi la temperatura limite θ_t.

$$\theta_t = \theta_a + \theta_c \left(\frac{R \cdot K^2 + 1}{R + 1}\right)^n + \theta_g \cdot K^{1,6}$$

I simboli usati nelle relazioni hanno il seguente significato:

e = base dei logaritmi neperiani;
P = potenza calorifica trasmessa;
θ = sovratemperatura dell'olio più caldo sull'ambiente;
θ_i = sovratemperatura dell'olio più caldo sull'ambiente all'inizio del transitorio;
θ_c = sovratemperatura dell'olio più caldo nell'ambiente per carico nominale;
P_i = potenza calorifica generata all'inizio del transitorio;
P_c = potenza calorifica generata per carico nominale;
C = capacità termica del trasformatore;
T_r = costante di tempo calcolata in base alle caratteristiche del trasformatore;
K = rapporto fra carico applicato e carico nominale;
R = rapporto fra le perdite nel rame e quelle sul ferro misurate a pieno carico a 75 °C;
θ_g = gradiente di temperatura del punto più caldo a carico nominale
θ_{gx} = gradiente di temperatura del punto più caldo a un carico qualunque;
θ_{cm} = sovratemperatura media del rame per il carico nominale ottenuta per variazione di resistenza;
θ_a = temperatura ambiente media;
θ_r = temperatura limite del punto più caldo degli avvolgimenti;
t = tempo in ore;
n = coefficiente che assume i seguenti valori:

- 0,8 per raffreddamento naturale o ad acqua;
- 1 per raffreddamento forzato.

METODO GRAFICO PER LA VALUTAZIONE PREVENTIVA DEL COMPORTAMENTO DEI TRASFORMATORI IN OLIO DURANTE I SOVRACCARICHI

Come i lettori avranno potuto notare l'applicazione delle equazioni riportate è piuttosto complessa; ed è solo possibile quando, attraverso prove, si sia pervenuti alla conoscenza di molti valori, senza i quali non sarebbe possibile arrivare a un risultato accettabile.

Come avevamo premesso la soluzione del problema può essere rapidamente trovata mediante l'applicazione di un metodo grafico indicato dall'ASA.

Prima d'iniziare l'esposizione del metodo riteniamo utile riportare i limiti di temperatura che l'American Standard Association (Standard C-57) raccomanda, e che possono ritenersi come valori di sicurezza nel funzionamento dei trasformatori in condizioni di sovraccarico.

a) Limite di temperatura quando questa venga mantenuta in modo continuo:

Temperatura del punto più caldo negli avvolgimenti 95 °C.

b) Limiti di temperatura per macchine sottoposte a condizioni di sovraccarico ricorrenti e di breve durata.

Tenendo presente che, un sovraccarico di breve durata, e ricorrente, è generalmente imposto secondo una successione nota, e non più spesso di una volta ogni 24 ore, i limiti di temperatura riferiti al punto più caldo negli avvolgimenti sono raccolti nella tabella 75.

TABELLA N. 75 – **Limiti di temperatura per sovraccarichi ricorrenti di breve durata**

Tempo del sovraccarico per ogni 24 ore	2 ore	8 ore	24 ore
Temperatura del punto più caldo ...	110 °C	105 °C	95 °C

c) Limiti di temperatura per macchine sottoposte a condizioni di sovraccarico non ricorrenti e di breve durata.

Considerando che un sovraccarico di breve durata, e non ricorrente, può essere considerato come un avvenimento eccezionale e quindi infrequente, i limiti di temperatura, riferiti al punto più caldo negli avvolgimenti, possono essere modificati rispetto a quelli riportati nella tabella 75 secondo quanto è esposto nella tabella 76.

TABELLA N. 76 – **Limiti di temperatura per sovraccarichi di breve durata.**

Tempo di carico di emergenza	2 ore	8 ore	24 ore
Temperatura nel punto più caldo ...	115 °C	110 °C	105 °C

Esaurita questa necessaria premessa passiamo alla descrizione del metodo che si basa su un gruppo di curve da noi riportate nelle figure dalla 118 alla 124 dedotte da prove pratiche.

Le curve sono tracciate su ordinate cartesiane lineari e ogni curva è stata ridotta alla sua forma più semplice. I dati richiesti per i calcoli da eseguire sono quelli rilevabili dalla targa del trasformatore e dalle prove di collaudo eseguite.

Tanto perchè il lettore possa avere una chiara idea dell'esposizione del metodo occorre premettere che la risoluzione di un problema di riscaldamento in un trasformatore di potenza si basa sulle seguenti definizioni:

1) *Sovratemperatura dell'olio.*

Si definisce « sovratemperatura dell'olio » il salto di temperatura del punto più caldo dell'olio sulla temperatura ambiente.

2) *Gradiente del rame.*

Si definisce « gradiente del rame » la differenza di temperatura fra il punto più caldo del rame, generalmente posto in alto, e il punto più caldo dell'olio.

3) *Sovratemperatura a regime.*

Si definisce « sovratemperatura a regime » quella che sarà raggiunta quando un carico costante sia mantenuto per il tempo necessario affinchè le temperature permangano costanti.

4) *Costante di tempo termica.*

Si definisce « costante di tempo termica » il numero che esprime il tempo che sarebbe necessario per raggiungere la sovratemperatura di regime, supponendo che tutto il calore venisse immagazzinato e non dissipato dalla superficie di raffreddamento. (Il modo di calcolare la costante di tempo termica verrà indicato nel corso della trattazione).

Sovratemperatura di regime

È stato assodato, dopo molte prove, che la sovratemperatura di regime dell'olio, nei trasformatori a raffreddamento naturale e a raffreddamento ad acqua, varia, approssimativamente, con la potenza 0,8 delle perdite totali.

Il grafico riportato nella fig. 118 fornisce i valori di K per la determinazione della sovratemperatura dell'olio per vari carichi, in trasfor-

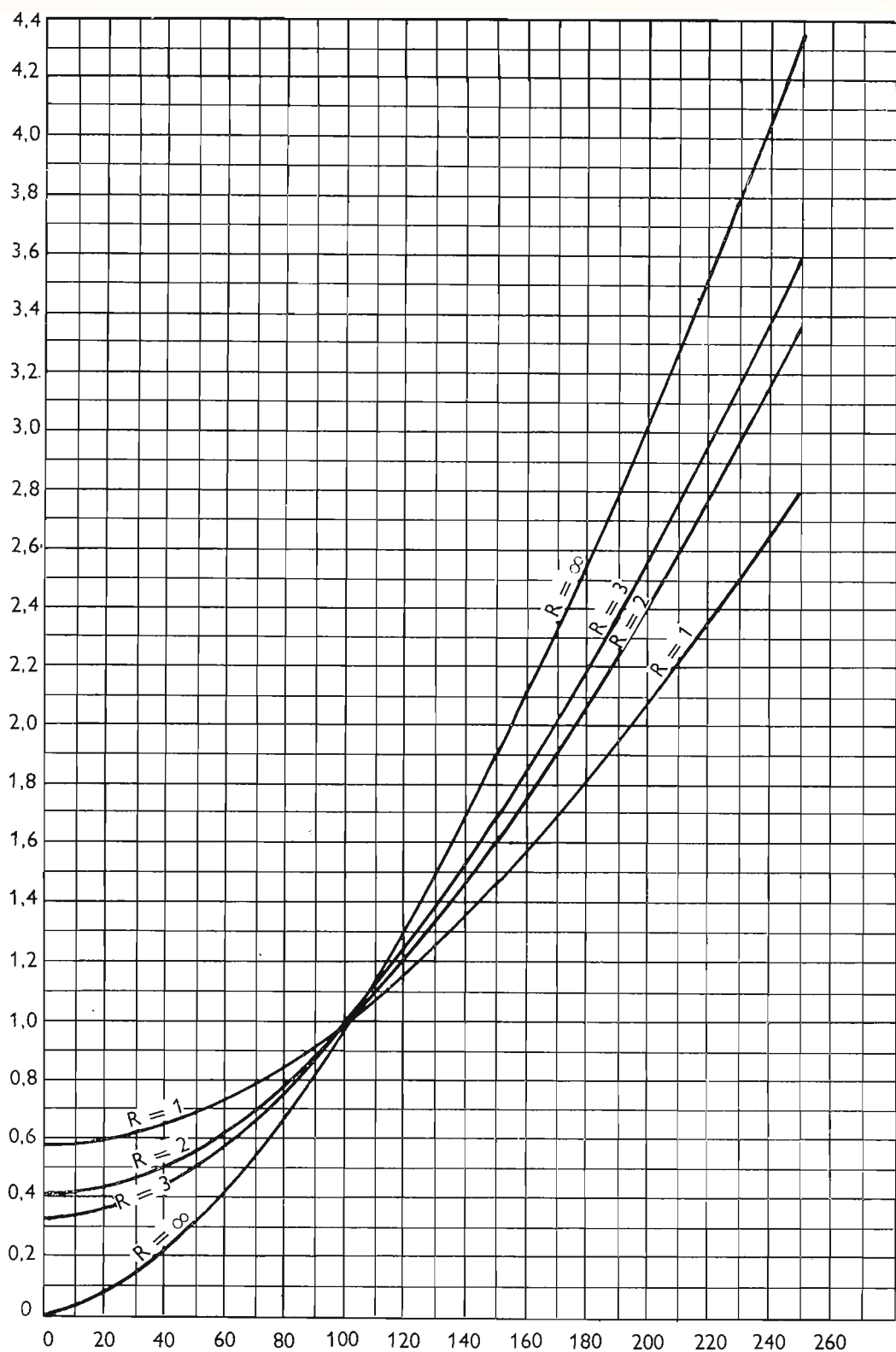



Fig. 118 – Grafico per la determinazione della sovratemperatura a regime dell'olio per vari carichi per trasformatori a raffreddamento naturale e ad acqua.

matori il rapporto fra le perdite nel rame e quelle nel ferro assuma un valore di 1-2-3 e infinito.

Per trovare il valore della sovratemperatura di regime dell'olio è solo necessario cercare sull'ascissa il valore del carico richiesto, portandolo sopra la curva corrispondente al rapporto fra le perdite nel rame e nel ferro proprio del trasformatore in corrispondenza del carico nominale, e leggere il valore del fattore K.

Il valore della sovratemperatura di regime dell'olio al carico desiderato si avrà dal prodotto del fattore K con il valore della sovratemperatura di regime dell'olio al 100% di carico rilevata durante le prove.

Nei trasformatori a raffreddamento forzato con aria, o a circolazione forzata d'olio, la sovratemperatura di regime dell'olio varia con la prima potenza delle perdite totali e richiede curve diverse che sono riportate nel grafico esposto nella fig. 119.

Il gruppo di curve riportato nella fig. 120 fornisce il valore dei gradienti del rame al carico desiderato, in funzione dei gradienti del rame a pieno carico.

Per trovare il valore del gradiente del rame, è sufficiente cercare il valore del carico considerato sull'ascissa, portarlo sulla curva del gradiente del rame a pieno carico proprio del trasformatore, leggendo il valore cercato sulla scala delle ordinate.

Curve di riscaldamento e di raffreddamento

Nei grafici riportati nelle figg. 121 e 122 sono indicate le curve che permettono di stabilire la sovratemperatura dell'olio nelle fasi di riscaldamento e di raffreddamento per varie sovratemperature di regime, da usare per trasformatori a raffreddamento naturale, o con circolazione d'acqua, aventi costanti di tempo termiche di 2-3-4-6 ore; nei grafici riportati nelle figg. 123 e 124 sono indicate curve similari adatte per trasformatori raffreddati ad aria forzata e a circolazione forzata d'olio.

È opportuno dire che anche le curve riportate nelle figg. 121 e 122 possono essere usate a questo scopo con un errore molto modesto.

È da notare che la curva corrispondente alla prima ora di funzionamento è stata tracciata usando una scala allargata onde facilitare la lettura. Tutte le curve di raffreddamento iniziano con la sovratemperatura di 100 °C.

Ci si può chiedere perchè per arrivare a stabilire il valore della sovratemperatura dell'olio occorra conoscere il valore della costante di tempo

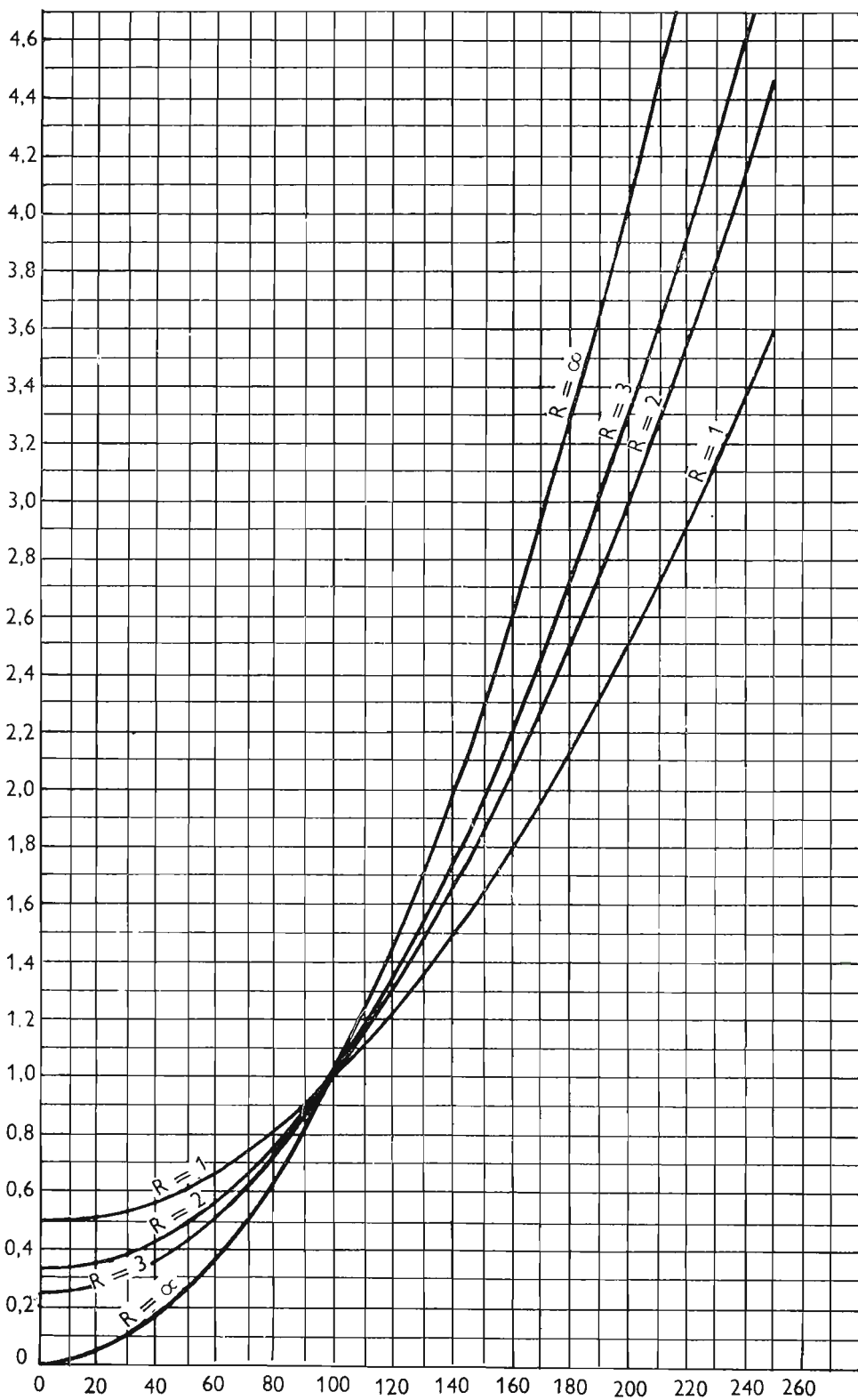



Fig. 119 – Grafico per la determinazione della sovratemperatura a regime dell'olio per vari carichi per trasformatori a raffreddamento ad aria forzata o a circolazione forzata d'olio.

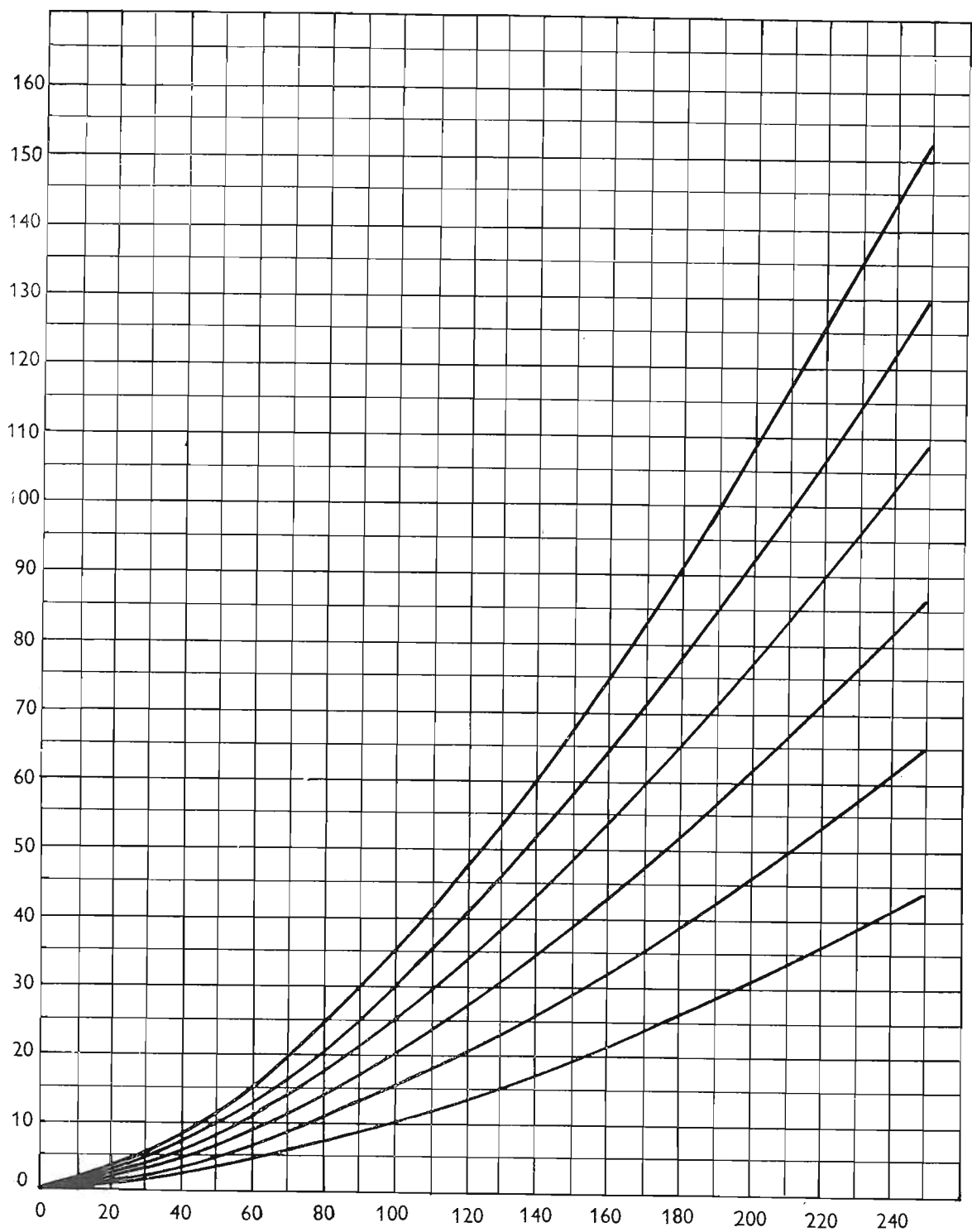



Fig. 120 – Grafico dei gradienti del rame sull'olio.

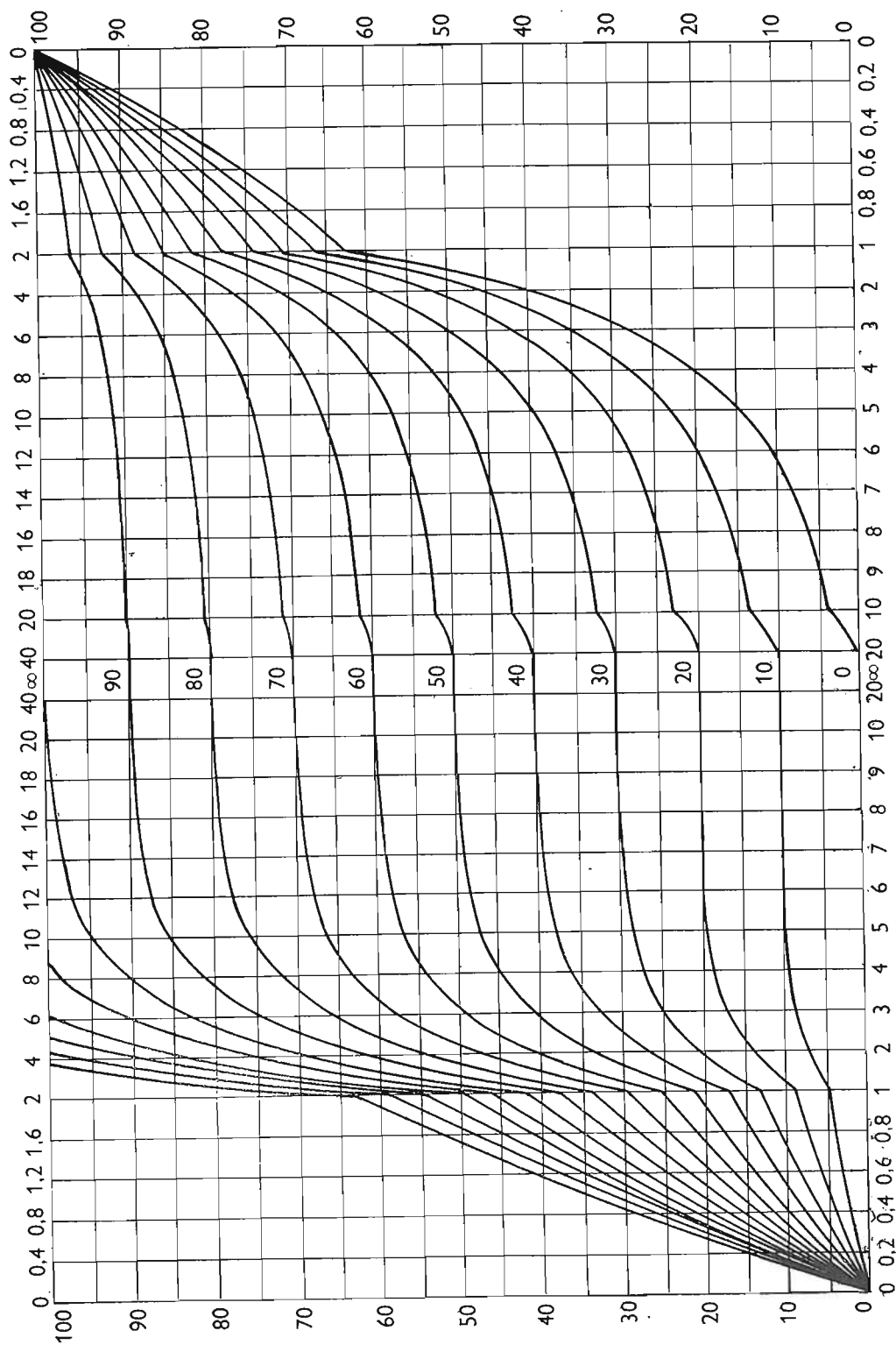



Fig. 121 – Curve di riscaldamento dell'olio per trasformatori a raffreddamento naturale o ad acqua (costante di tempo = 2 e 4 ore).

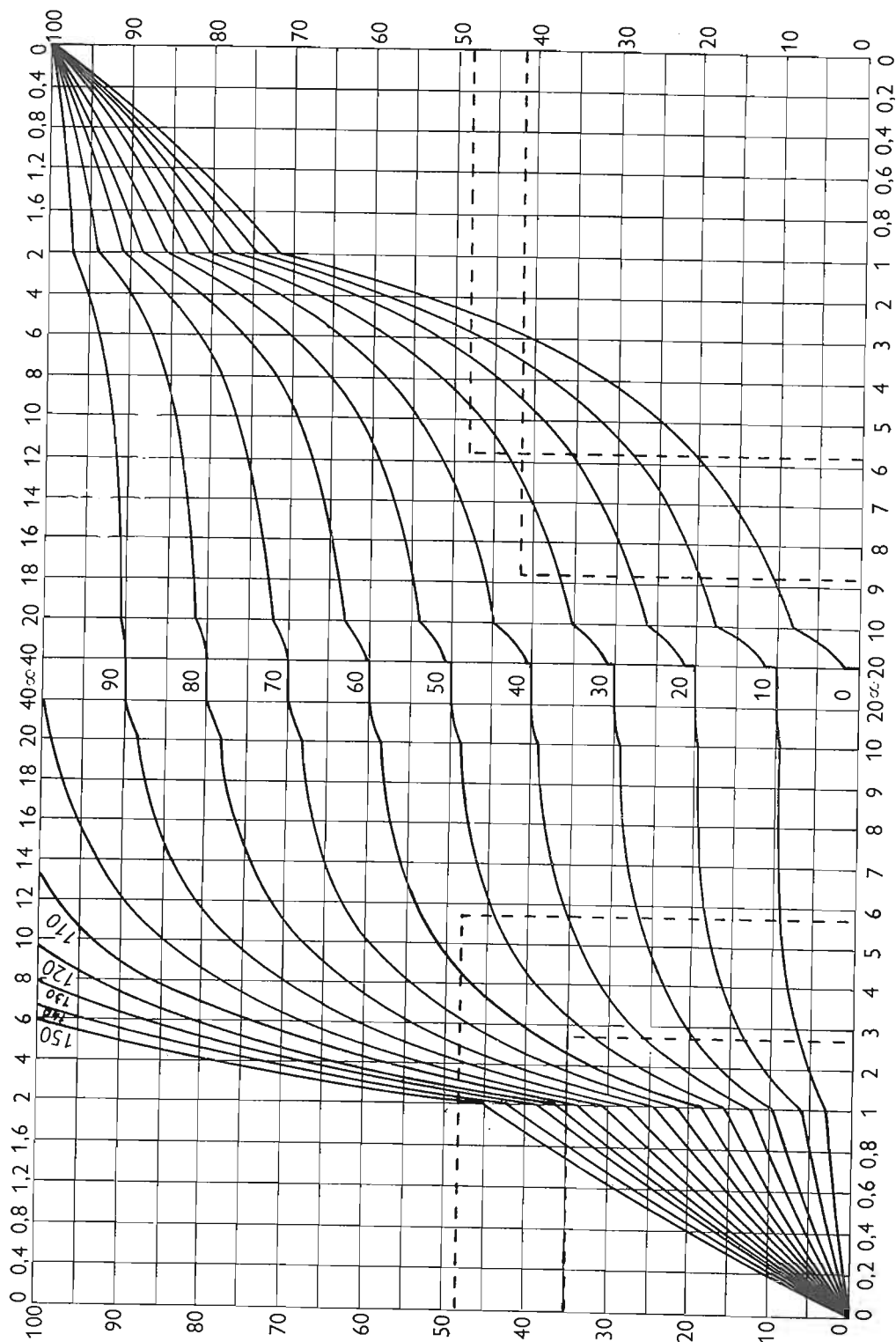



Fig. 122 – Curve di riscaldamento dell'olio per trasformatori a raffreddamento naturale o ad acqua (costante di tempo = 3 e 6 ore).

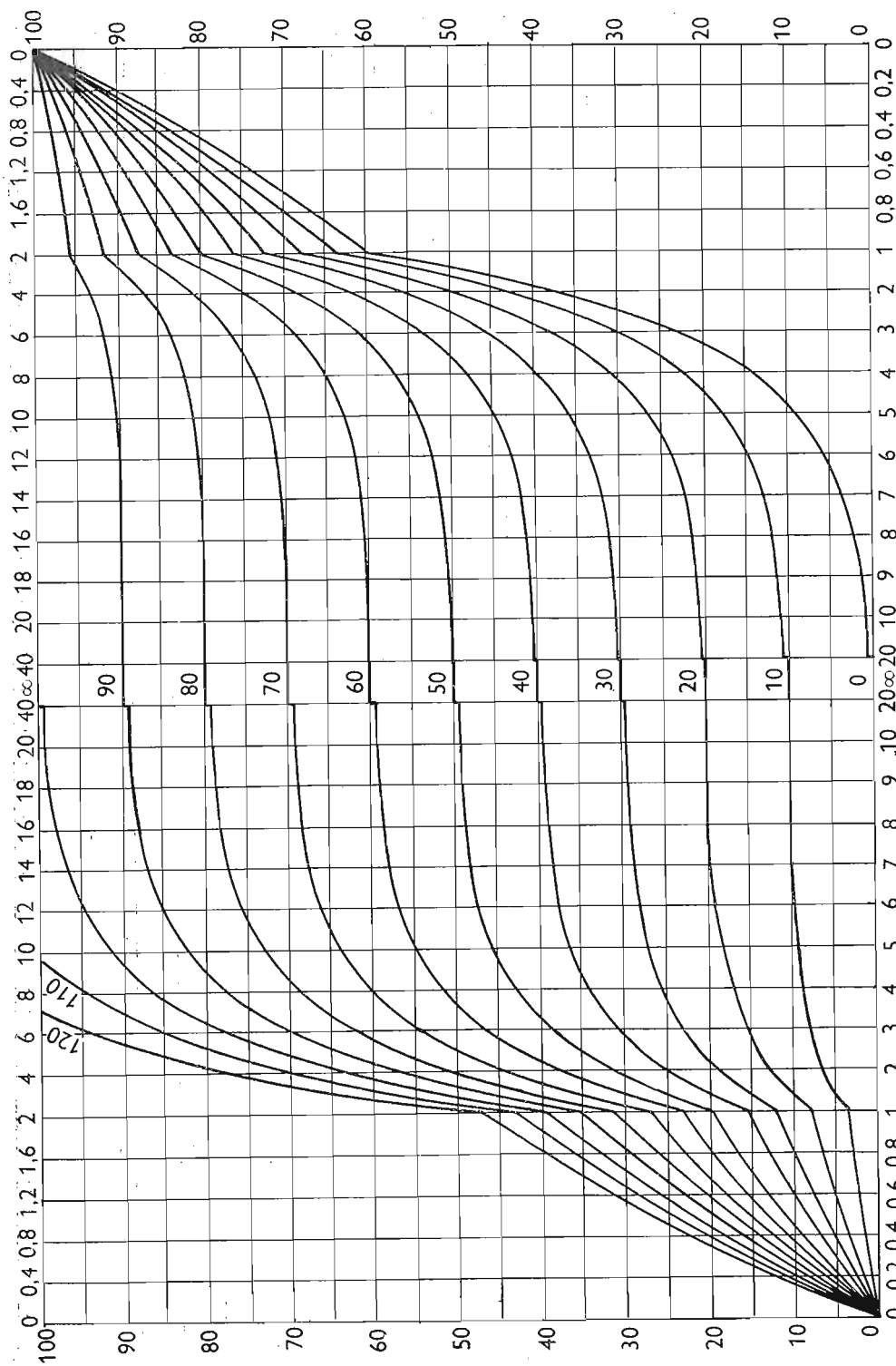



Fig. 123 – Curve di riscaldamento dell'olio per trasformatori raffreddati ad aria forzata o a circolazione forzata d'olio (costante di tempo = 2 e 4 ore).

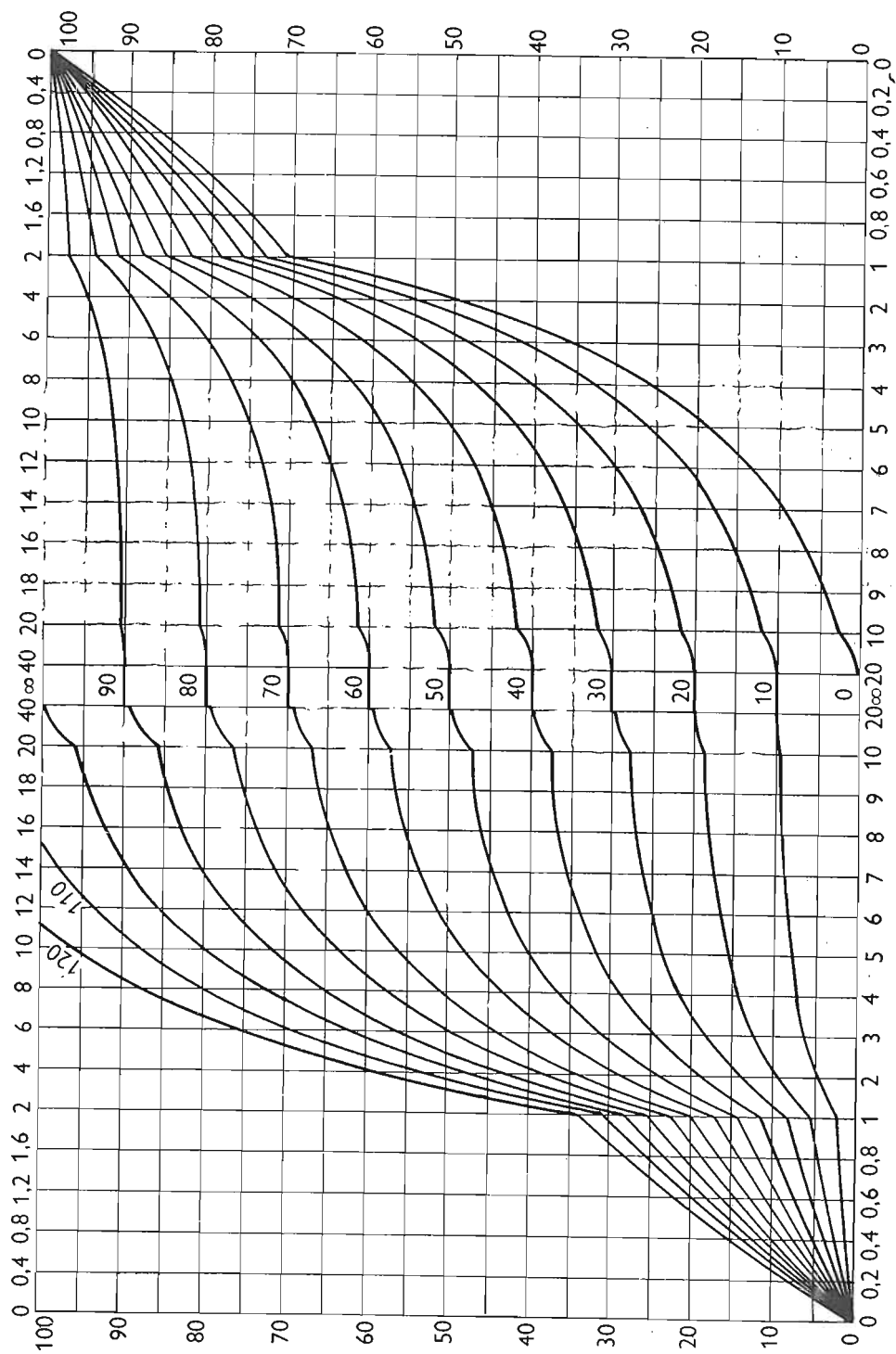



Fig. 124 – Curve di riscaldamento dell'olio per trasformatori raffreddati ad aria forzata o a circolazione d'olio (costante di tempo = 3 e 6 ore).

termica, relativa, mentre per il gradiente del rame non si tiene conto di questo valore.

Occorre pensare che il rame raggiunge la temperatura di regime molto prima dell'olio e che quindi la sua costante di tempo può essere considerata trascurabile.

La costante di tempo può essere ricavata dalla seguente relazione

$$T = \frac{\Delta\theta \cdot C}{P_t}$$

nella quale T rappresenta il valore della costante di tempo termica in ore; $\Delta\theta$ il valore della sovratemperatura di regime dell'olio sull'ambiente; C la capacità termica del trasformatore completo, il cui valore si ricava da:

0,125 kg avvolgimento e circuito magnetico + 0,0885 kg cassone + 0,39 kg di olio, infine P_t rappresenta il valore delle perdite totali in watt ad un dato carico.

Esempio.

Perchè il metodo grafico resti chiaro al lettore pensiamo sia opportuno riprodurre un esempio pratico.

Ammettiamo di dover caricare un trasformatore isolato in olio a raffreddamento naturale al 130% di carico per tre ore, sapendo che all'inizio del transitorio, la temperatura dell'olio è di 60 °C, mentre la temperatura ambiente è di 25 °C. Si vuol conoscere il valore della temperatura nel punto più caldo degli avvolgimenti alla fine del sovraccarico.

Il trasformatore in questione ha le seguenti caratteristiche, desunte dai dati di targa e dai risultati delle prove di collaudo d'accettazione:

Perdite nel ferro	13 kW	(dalle prove)
Perdite nel rame a pieno carico a 75 °C	26 kW	(dalle prove)
Sovratemperatura dell'olio a regime per le condizioni di pieno carico	40 °C	(dalle prove)
Sovratemperatura del rame a regime per le condizioni di pieno carico	45 °C	(per resistenza dalla prova di riscaldamento)
Costante di tempo termica ricavata dalla prova di riscaldamento e calcolabile con la formula precedente	3,50 ore	

Risoluzione del problema.

Sarà necessario, prima di tutto riportare in una tabella come quella esposta a pag. 77 i valori noti e quelli calcolati, in modo da facilitare il compito ed evitare errori.

Il valore del gradiente del rame per questo trasformatore per le condizioni nominali è:

$$45 + 10 - 40 = 15\ ^{\circ}\mathrm{C}$$

La sovratemperatura iniziale dell'olio si otterrà eseguendo la differenza fra la temperatura letta (60 °C) e quella dell'ambiente (25 °C):

$$60 - 25 = 35\ ^{\circ}\mathrm{C}$$

Il rapporto fra le perdite nel rame e nel ferro sarà

$$\frac{26}{13} = 2$$

La costante K in corrispondenza del 130% di carico, rilevata dal grafico della fig. 118, sarà uguale a 1,36, quindi la sovratemperatura finale, a regime termico, dell'olio sarebbe:

$$1{,}36 \cdot 40 = 54{,}4\ ^{\circ}\mathrm{C}$$

Il valore della costante di tempo T al 100% di carico può essere usato per tutto il problema.

Essendo T uguale a 3,50 sarà opportuno considerare T uguale a 3; avremo così una sovratemperatura dell'olio maggiore che per T uguale a 4, e quindi con un margine di sicurezza, sebbene l'errore commesso sia modesto.

Si tratta ora di trovare il valore della sovratemperatura dell'olio per una costante di tempo uguale a 3. Facendo riferimento alla curva della fig. 122 si sceglie sulle ordinate la sovratemperatura iniziale dell'olio (35 °C), sulla curva corrispondente alla propria sovratemperatura di regime. In questo caso la sovratemperatura di regime dell'olio è 54,4 °C, posta, approssimativamente, a metà fra le curve dei 50 °C e dei 60 °C. Per quel punto (35 °C) l'ascissa fornisce il valore del tempo corrispondente all'inizio del transitorio che è di 2,7 ore.

Dopo le tre ore di sovraccarico il tempo sull'ascissa sarà

$$2{,}7 + 3 = 5{,}7 \text{ ore}$$

quindi a 5,7 ore si cerca il punto a metà fra le curve di 50 e 60 °C che indica un valore di sopraelevazione di temperatura dell'olio di 48,5 °C.

Avremo così trovato il valore della sovratemperatura dell'olio dopo tre ore di sovraccarico.

Il gradiente del rame, facendo riferimento alle curve riportate nella fig. 120, al 130% di carico, con 15 °C di gradiente a pieno carico, è di 22,5 °C.

La temperatura finale del punto più caldo degli avvolgimenti sarà data dalla somma dei valori di sovratemperatura dell'olio, del gradiente del rame, e della temperatura ambiente, ossia

$$48,5 + 22,5 + 25 = 96\ ^{\circ}C$$

Ricordando i limiti raccomandati dall'A.S.A. esposti nella prima parte della trattazione, potremo dire che, se il sovraccarico è considerato come ricorrente, il trasformatore non esce dai limiti di sicurezza.

Vediamo ora di stabilire, attraverso l'uso delle curve, un altro dato che può essere interessante, ossia supponiamo che al termine del sovraccarico (130% per tre ore) il trasformatore venga sottoposto per altre 3 ore ad un carico pari al 90% del nominale, e che si voglia stabilire la temperatura che avrà assunto il punto più caldo del rame al termine del nuovo transitorio.

Il procedimento da seguire è uguale, sia per il raffreddamento che per il riscaldamento, quindi cominciamo a calcolare il valore della sovratemperatura a regime dell'olio in corrispondenza del 90% del carico, essa sarà secondo le curve riportate nella fig. 118:

$$0,90 \cdot 40 = 36\ ^{\circ}C$$

tenendo conto che la sovratemperatura iniziale dell'olio non è più di 35 °C, ma di 48,5 °C.

Con una costante di tempo termica di tre ore, una sovratemperatura iniziale di 48,5 °C e una finale di 36 °C, usando il grafico di fig. 122 il punto di partenza per il 90% del carico sarà di 5,8 ore, quindi dopo 3 ore si arriva a 8,8 ore con una sovratemperatura dell'olio di 42 °C.

Il gradiente del rame a pieno carico (fig. 120) sarà di 12,6 °C, quindi la temperatura finale del punto più caldo degli avvolgimenti dopo 3 ore di raffreddamento con il 90% del carico sarà

$$42 + 12,6 + 25 = 79,6\ ^{\circ}C$$

Il procedimento, per trasformatori raffreddati con aria forzata o a circolazione d'olio forzata è lo stesso, con la sola differenza che, per ottenere un più alto grado di precisione, conviene usare le curve riportate nelle figg. 123 e 124.

Nella tabella 77 sono raccolti i dati derivati dalle prove e dai calcoli.

TABELLA N. 77 – **Esempio di tabella per la raccolta delle caratteristiche e dei risultati ottenuti con il metodo grafico.**

Carico percentuale	100	130	90	dato
Perdite nel ferro (W)	13 000			»
Perdite nel rame a 75 °C (W)	26 000			»
Perdite totali (W)	39 000			»
Durata del transitorio (ore)		3	3	»
Sovratemperatura iniziale (°C)		35	48,5	»
« K »	1	1,36	0,90	calcolato
Sovratemp. di regime dell'olio (°C)	40	54,4	36	fig. 118
« T » (ore)	3,55			dato
Gradiente del rame (°C)	15	22,5	12,6	fig. 120
Sovratemperatura dell'olio alla fine del transitorio considerato (°C)	40	48,5	42	fig. 122
Ambiente (°C)	25	25	25	dato
Temperat. del punto più caldo (°C)	80	96	79,6	calcolato

L'esempio riportato è relativo ad un trasformatore di potenza notevole, vediamo ora come, usando lo stesso metodo, sia possibile arrivare ad ottenere i parametri necessari alla determinazione delle protezioni da sovraccarico per trasformatori installati nelle cabine di distribuzione.

Supponiamo di dovere agire su un trasformatore di tipo unificato (Capitolato ANIDEL) avente una potenza nominale di 315 kVA con le seguenti caratteristiche:

Perdite:

— perdite nel rame (P_{cc}) 3470 W
— perdite nel ferro (P_f) 720 W
— perdite totali (P_t) 4190 W

Sovratemperature a regime:

— sovratemperatura dell'olio a carico nominale (θ_c) 37 °C
— sovratemperatura degli avvolgimenti (θ_{cm}) 52 °C.

Pesi:

— nucleo e avvolgimenti (*a*)	762 kg
— cassone e accessori (*b*)	498 kg
— olio (*c*)	280 kg

Il rapporto (R) fra le perdite nel rame e quelle nel ferro sarà:

$$R = \frac{P_{cc}}{P_f} = \frac{3470}{720} = 4{,}81$$

La sovratemperatura del rame sull'olio (convenzionale) sarà

$$\theta_g = \theta_{cm} - \theta_c + 10 = 52 - 37 + 10 = 25\ {}^{\circ}\mathrm{C}$$

Capacità termica del trasformatore:

$$C = 0{,}135\, a + 0{,}0885\, b + 0{,}39\, c =$$
$$= 0{,}135 \times 762 + 0{,}0885 \times 498 + 0{,}39 \times 280 = 256{,}14 \quad \mathrm{Wh/{}^{\circ}C}$$

Costante di tempo termica:

$$T = \frac{\theta_c \cdot C}{P_t} = \frac{37 \times 256{,}14}{4190} = 2{,}28 \text{ ore}$$

Stabiliti i dati necessari al calcolo formuliamo il problema che costituisce l'oggetto della ricerca:

— determinare il valore della temperatura del punto più caldo degli avvolgimenti del trasformatore considerato quando venga posto in un ambiente avente una temperatura media di 25 °C, e venga sovraccaricato, una volta ogni 24 ore, del 30% per due ore.

— determinare la temperatura corrispondente raggiunta dall'olio alla fine del transitorio.

Come prima operazione, avvalendoci delle curve riportate nella fig. 118 dovremo trovare il valore del coefficiente di moltiplicazione della sovratemperatura dell'olio a pieno carico con riferimento al sovraccarico stabilito, senza tener conto del raffreddamento contemporaneo del trasformatore.

In questo caso per R maggiore di 3 la curva assumerà un andamento medio fra $R = 3$ e $R = \infty$ perciò in corrispondenza del 130% del carico leggeremo un valore del coefficiente uguale a 1,45.

Moltiplicando

$$37 \times 1{,}45$$

avremo

$$53{,}65\ ^{\circ}C$$

Per ottenere ora l'effettiva temperatura dell'olio alla fine del transitorio tenendo conto del contemporaneo raffreddamento è necessario usare il diagramma riportato nella fig. 121. Esso è usabile dall'alto o dal basso; la scelta è determinata dal valore della costante termica, in quanto le curve sono riferite, rispettivamente, a trasformatori aventi una costante di due ore, e a trasformatori aventi una costante di 4 ore.

Nel nostro caso useremo la prima essendo il valore di T molto prossimo al due.

Sui valori di temperatura posti nel diagramma sulla linea mediana, a destra di chi guarda, occorre scegliere una curva corrispondente a 53,65 °C, interpolando naturalmente fra quelle tracciate e scendendo lungo di essa fino a trovare il valore della sovratemperatura di partenza (37 °C).

Da questo punto, scendendo sull'ascissa corrispondente, si rileva un certo valore di tempo (2 ore) che aggiunto alla durata prestabilita del transitorio, fornirà una posizione dalla quale, risalendo sull'ascissa alla curva considerata, troveremo, nel punto d'intersezione, il valore della sovratemperatura cercato, il quale nel nostro caso è di 47 °C.

Questo valore, aggiunto a quello della temperatura media ambiente (25 °C), fornirà il valore della temperatura dell'olio alla fine del transitorio; 72 °C.

Vedremo poi quanta importanza assume questo valore che è rilevabile con esattezza dalla macchina funzionante.

Accertato questo dato sarà necessario assicurarsi che la temperatura assunta dal rame, alla fine del transitorio, non superi i limiti previsti dall'ASA.

Per far ciò nel diagramma riportata nella fig. 120 dovremo scegliere la curva che, per il 100% del carico, suppone un gradiente del rame sull'olio di 25 °C, e che corrisponde alla terza curva, partendo dall'alto. tiplicata per il tempo).

In corrispondenza della stessa curva, in riferimento al 130%, troviamo un gradiente di 38 °C, quindi il punto più caldo dell'avvolgimento, alla fine del transitorio, risulterà dalla somma della temperatura

ambiente, della sovratemperatura dell'olio alla fine del transitorio, e del gradiente di temperatura del rame sull'olio, ossia

$$47 + 38 + 25 \doteq 110\ ^{\circ}\mathrm{C}$$

esattamente uguale a quello dato come ammissibile dall'ASA, per sovraccarichi ricorrenti ogni 24 ore, aventi la durata di 2 ore.

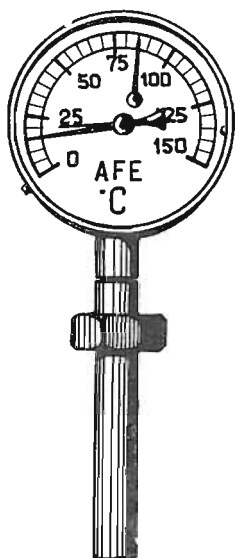
Seguendo questo criterio di calcolo, facilmente verificabile nella grande maggioranza dei trasformatori unificati, si può stabilire, come regola generale, che le macchine possano senza danni, superare un transitorio di sovraccarico del 30% rispetto al nominale, a condizione che la sua durata non superi le due ore, e non si verifichi che una volta ogni 24 ore.

In questo caso, qualora sulla macchina venga inserito un termometro con sensibile a mercurio (fig. 125) completato con un contatto di massima tarabile posto in corrispondenza di 70 °C e un interruttore automatico con relè termici tarati al 130% rispetto al carico nominale, facendo agire il contatto del termometro sulla bobina di apertura dell'interruttore stesso, potremo essere sicuri che il trasformatore svolgerà il compito prefissato senza conseguenze dannose per l'efficienza della macchina (vedere schema nella fig. 126).

Fig. 125 – Termometro con contatto di massima tarabile, agente con sensibile a mercurio adatto alla installazione nel pozzetto termometrico dei trasformatori.

Infatti, mentre l'interruttore non potrà rimanere chiuso quando il sovraccarico supera il 29% del carico nominale, il termometro farà aprire lo stesso interruttore quando la temperatura dell'olio dovesse superare i 70 °C, impedendo che il punto più caldo del rame si porti oltre i 110 °C.

Con questi due apparecchi si impedisce anche che le variazioni, in senso peggiorativo, dei dati posti come base del problema possano influire negativamente sul comportamento della macchina.

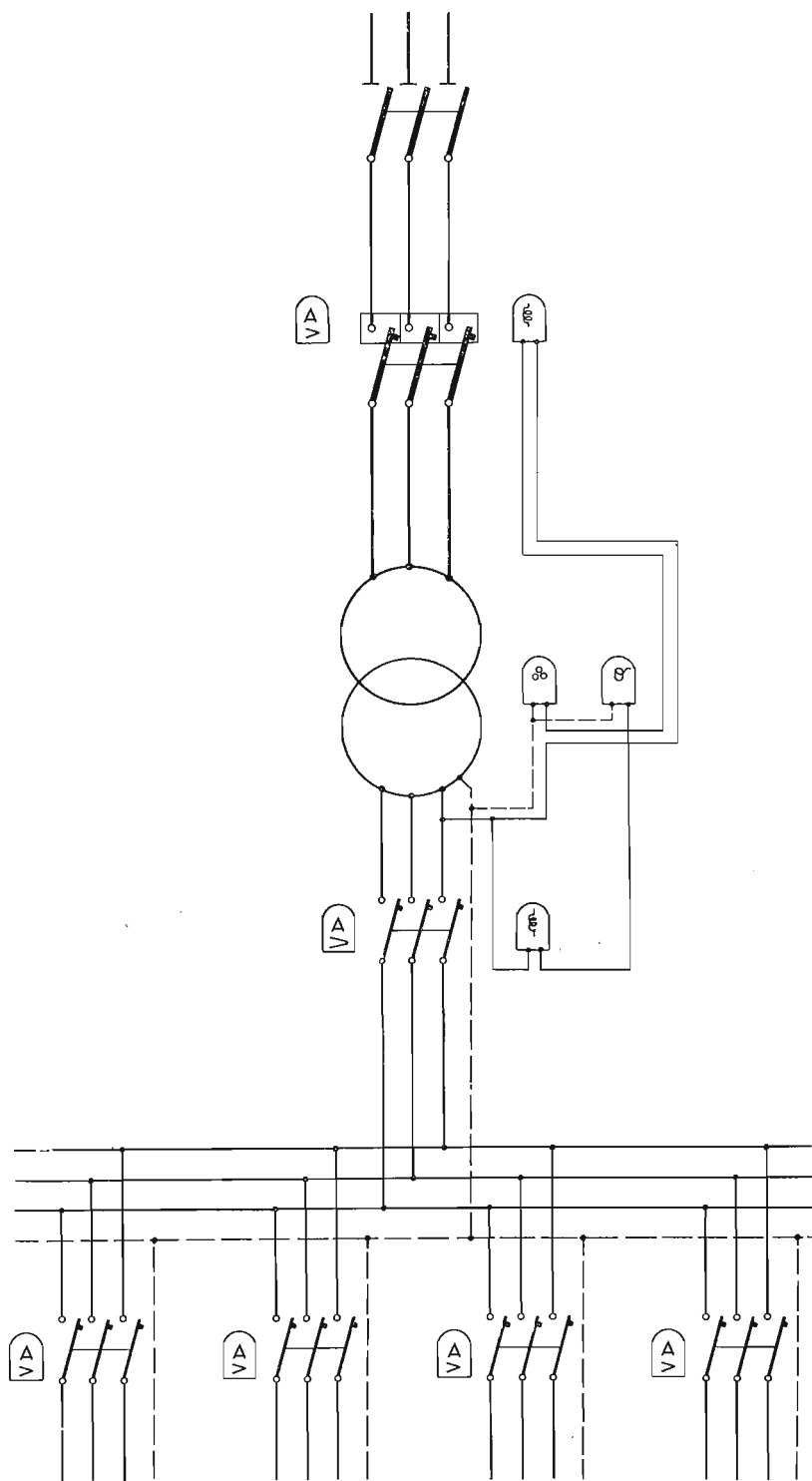



Fig. 126 – Schema della protezione da sovraccarico realizzata con termometro a contatto tarabile e interruttore generale automatico munito di bobina di apertura.

Il dato più aleatorio è quello che si riferisce alla temperatura ambiente media, poichè su di esso possono influire cause esterne non controllabili come l'occlusione delle aperture destinate alla ventilazione, effettuate da qualcuno infastidito dalla corrente d'aria conseguente.

Occorre ricordare che le cabine facenti parte di una rete di distribuzione sono molto numerose e la loro dislocazione può assumere distanze, dalla sede della Direzione Tecnica, anche di una diecina di chilometri, e che quindi la sorveglianza è quanto mai aleatoria.

Evidentemente, adottando lo schema riportato nella fig. 126, quando la macchina raggiunge i limiti prestabiliti di temperatura o di erogazione, il servizio si interrompe per tutti gli utenti serviti dalla cabina.

È però possibile ridurre notevolmente il disturbo adottando uno schema e apparecchiature diverse da quelle descritte, rendendo oltre tutto più economica l'attrezzatura della cabina, e diminuendo notevolmente il valore del momento d'interruzione (potenza non erogata moltiplicata per il tempo).

Supponendo che il carico sia equilibrato, una condizione che solo eccezionalmente non si verifica, sarà sufficiente installare, su uno dei conduttori di fase, subito a valle dei morsetti di trasformatore, un amperometro a filo caldo (fig. 127) alimentato da un riduttore di corrente.

L'amperometro è dotato di un contatto di massima tarabile, atto a chiudere il circuito della bobina di apertura di uno degli interruttori automatici posti sulle partenze degli elettrodotti di bassa tensione.

Il contatto suddetto deve essere connesso in parallelo con quello posto sul termometro (fig. 128).

È evidente che realizzando lo schema esposto nella fig. 128 solo una parte dell'utenza subirà un'interruzione quando vengano raggiunti i limiti predisposti.

Un commutatore, renderà possibile una rotazione logica, onde non sottoporre a una eventuale ripetizione dell'interruzione gli stessi utenti.

Questo schema offre inoltre un vantaggio sensibile che va al di la del semplice risparmio dovuto alla assenza dell'interruttore generale, in quanto, essendo gli interruttori posti sugli elettrodotti in partenza tarati per la protezione da corto circuito, a valori certamente inferiori di quelli prevedibili nell'eventuale interruttore generale, consente un distanziamento più sentito con la taratura dei relè dell'interruttore installato sulla media tensione a monte della macchina, permettendo una più efficiente selezione del guasto.

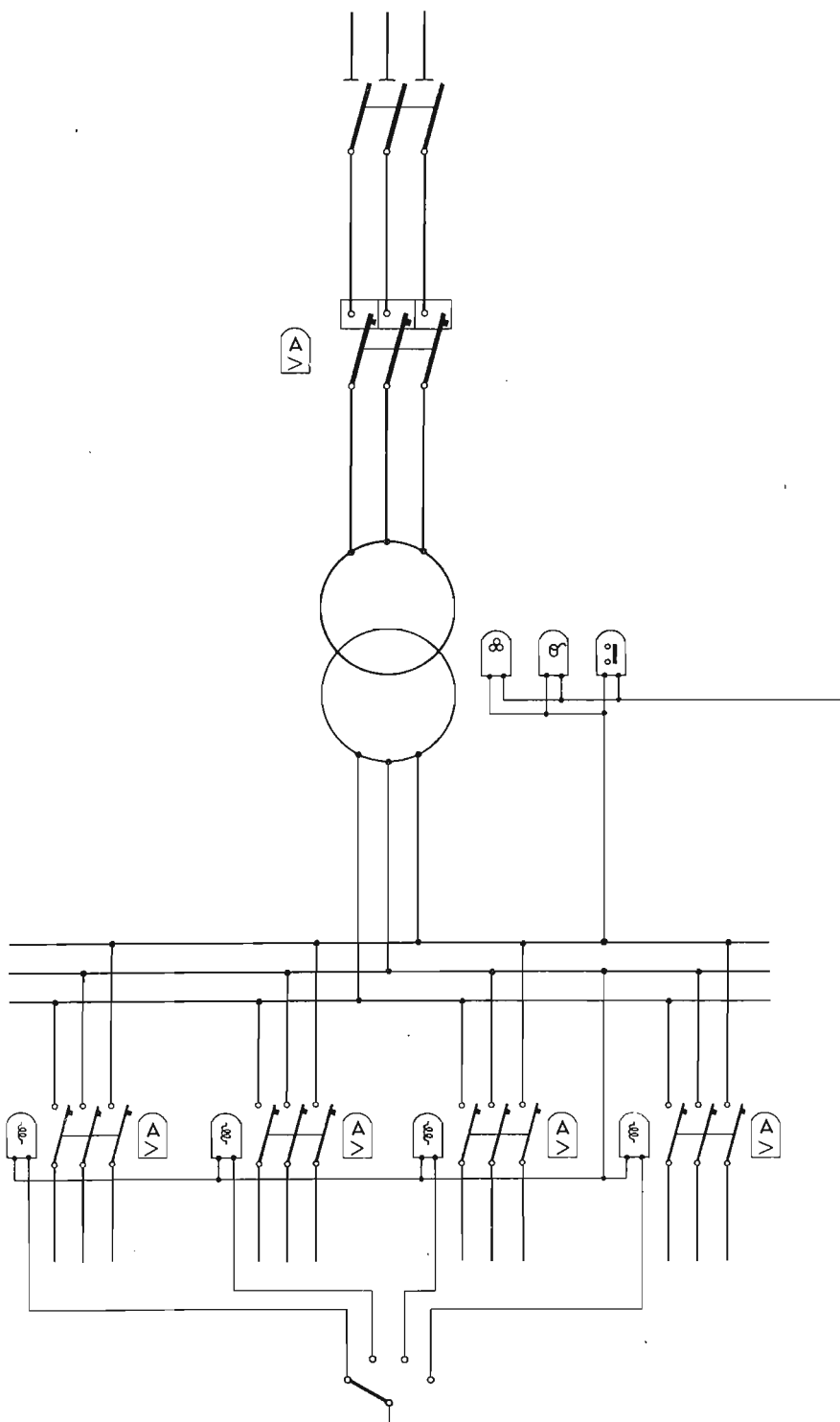



Fig. 127 – Schema della protezione da sovraccarico per trasformatori installati nelle cabine delle reti di distribuzione, atto ad ottenere la parzializzazione dell'interruzione del servizio.

Occorre notare che dotando l'amperometro di un indice di massima, si potrà, da questo, ricavare un'indicazione della punta massima di corrente erogata dal trasformatore, mentre l'indice normale potrà fornire l'indicazione del carico istantaneo.

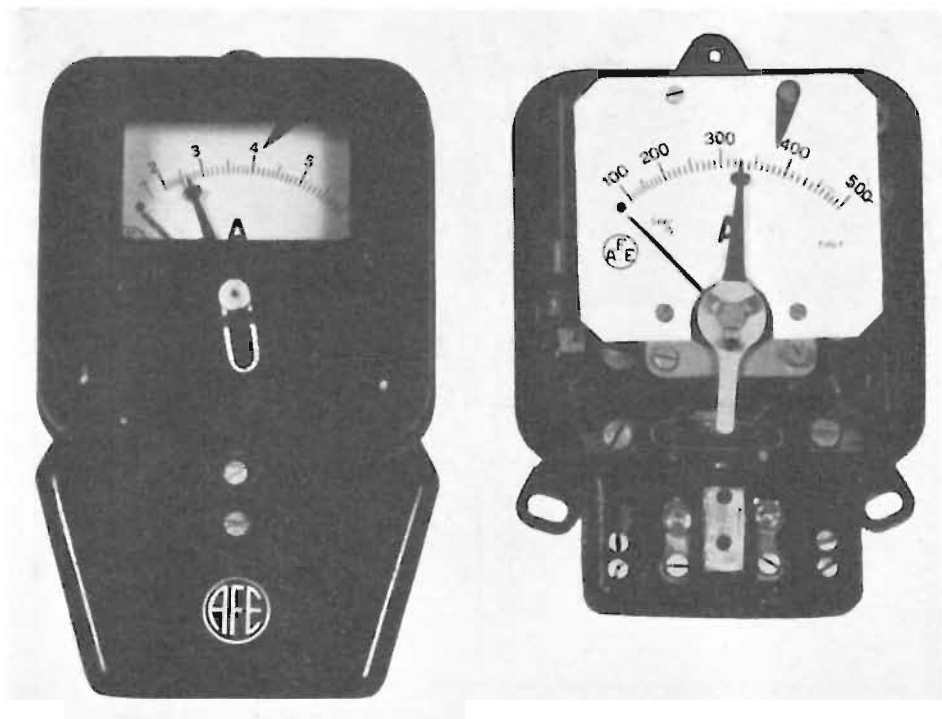



Fig. 128 – Amperometro a filo caldo AFE.

Altrettanto si può dire per il termometro, in modo che attraverso questi due strumenti potrà aversi un'idea abbastanza esatta del comportamento della macchina in corrispondenza delle condizioni più onerose.

L'amperometro che abbiamo riportato nella fig. 127 è uno strumento a filo caldo e perciò la sua risposta alle sollecitazioni del carico è rallentata rispetto ai normali strumenti elettromagnetici.

Questo, che a tutta prima sembrerebbe un difetto, si risolve in un vantaggio notevole, in quanto impedisce interventi intempestivi dovuti a punte di carico nettamente transitorie.

PROTEZIONE DAI GUASTI INTERNI

Esaminando le cause interne di guasto dei trasformatori, elencate a pag. 179 il lettore potrà rendersi conto che esse possono essere rivelate agli addetti alla conduzione dell'impianto in due modi:

— aumento della temperatura media dell'olio;
— formazione di gas di decomposizione.

Sulla macchina sarà quindi necessario installare un termometro, del tipo già descritto nella trattazione della protezione da sovraccarico, e un relè ad espansione di gas, solo possibile su macchine nelle quali è previsto il conservatore d'olio.

È evidente che quando si dovesse notare un aumento sensibile della temperatura dell'olio, non giustificabile con il carico o con il cambiamento stagionale della temperatura ambiente, dato per scontato il buon funzionamento delle prese d'aria di raffreddamento sarà necessario verificare la macchina onde non comprometterne l'efficienza.

Tralasciando per ora una trattazione più approfondita, che verrà fatta nella parte riguardante la manutenzione dei trasformatori vediamo quali sono le apparecchiature atte a proteggere i trasformatori dai guasti interni.

Le apparecchiature e gli accorgimenti destinati a proteggere i trasformatori dai guasti interni possono essere divisi in due categorie:

1) apparecchiature e accorgimenti che eliminano le cause del guasto;

2) apparecchiature che limitano le conseguenze del guasto mediante un pronto distacco della macchina dall'alimentazione.

Fra le apparecchiature e gli accorgimenti atti ad impedire che si creino le condizioni di guasto sono da considerare:

— il conservatore d'olio;
— l'essiccatore d'aria;
— la verifica periodica della rigidità dielettrica e dell'acidità organica.

Le apparecchiature che limitano le conseguenze del guasto possono essere compendiate nei due seguenti apparecchi:

— relè ad espansione di gas;
— protezione differenziale.

Il *conservatore*, creando un battente d'olio al disopra del coperchio, impedisce la formazione di cuscinetti d'aria umida fra le superficie

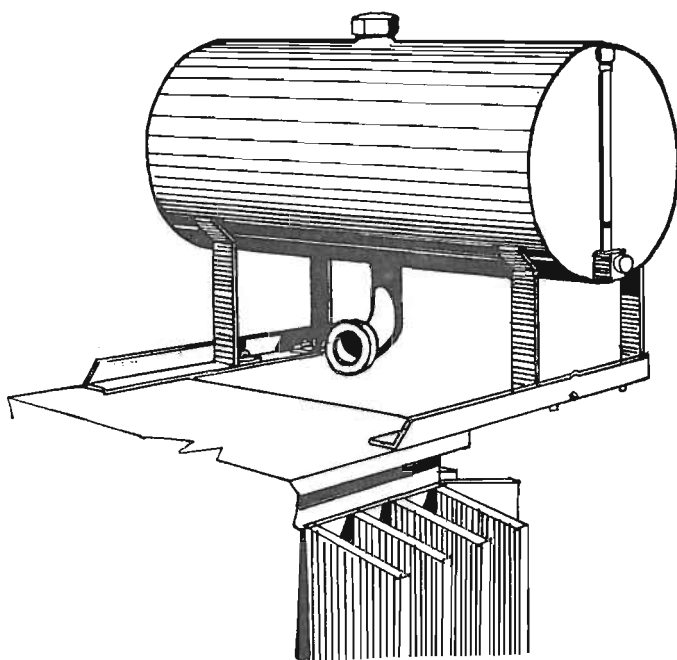
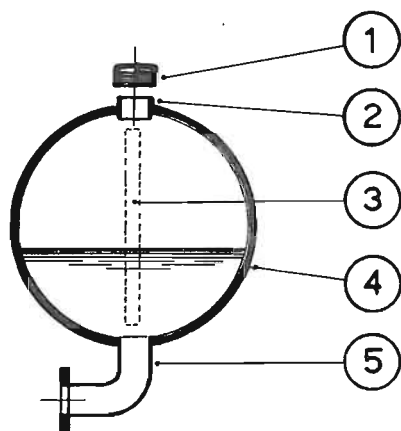



Fig. 129.

Conservatore d'olio in un trasformatore (sezione):

1) tappo a vite; 2) bocchettone filettato per il tappo; 3) indicatore di livello dell'olio; 4) sezione del contenitore; 5) tubo per l'adduzione dell'olio alla macchina.

dell'olio e il coperchio stesso, riscontrabili nelle macchine mancanti di questo accessorio, nei periodi durante i quali, diminuendo il valore del carico e conseguentemente la temperatura, il livello diminuisce (fig. 129).

Il cuscinetto d'aria, umida e fredda, ossida le molecole superficiali dell'olio che aumentando di peso precipitano verso il fondo e vengono attirate dagli isolanti per azione elettrostatica formandovi, col tempo, un rivestimento a efflorescenza, altamente coibente, che impedisce lo scambio di calore fra i conduttori e l'olio, fino a provocare l'interruzione delle spire per fusione del metallo.

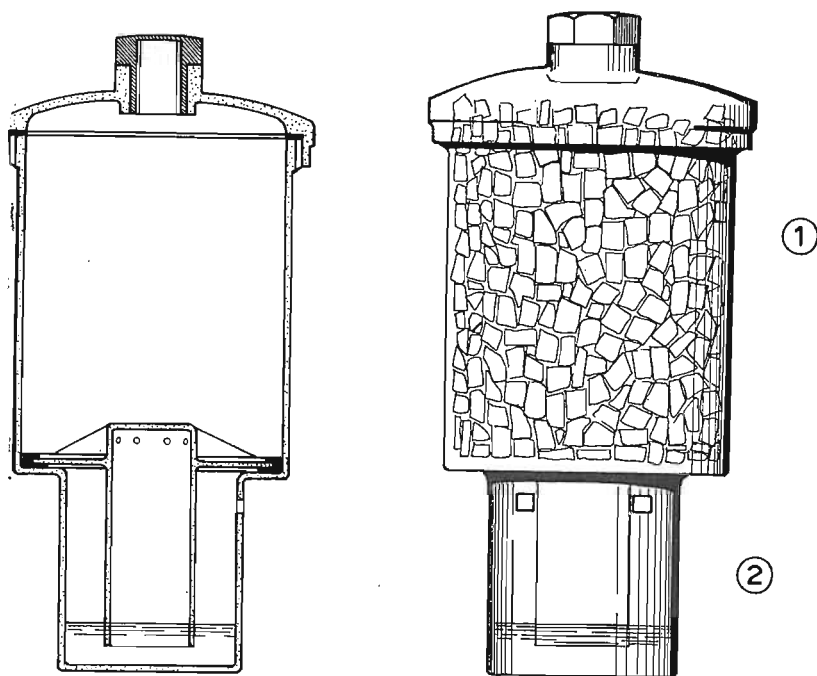



Fig. 130 – Essiccatore d'aria per trasformatori di potenza (ASPE).

Contemporaneamente l'aria umida compie un'azione ossidante sul lato inferiore del coperchio, dal quale, a lungo andare, si staccano particelle metalliche che vanno a depositarsi sugli avvolgimenti, diminuendo man mano le distanze isolanti, fino a provocare corti circuiti che mettono fuori servizio la macchina.

L'*essiccatore d'aria* viene applicato al trasformatore immettendolo nella parte inferiore del conservatore.

È costituito da un vaso, comunicante da un lato con la parte superiore dell'interno del conservatore e dall'altro con l'aria esterna.

Nella parte mediana del vaso è contenuto materiale igroscopico (generalmente gel di silice) che sottrae l'umidità all'aria costretta a passare attraverso di esso, per poter penetrare nell'interno del conservatore (fig. 130).

L'azione essiccante dell'apparecchio evita quindi l'ossidazione delle molecole superficiali dell'olio che, come abbiamo già visto, hanno un'azione negativa sulla macchina e impedisce azioni di condensazione nell'interno del conservatore.

Acidità dell'olio

Una delle cause di guasto più comuni è dovuta alle deficienze d'isolamento che si verificano per l'azione disgregatrice di olio eccessivamente acido, sugli isolanti di copertura dei conduttori costituenti le spire.

L'aumento dell'acidità organica è conseguente alle reazioni dell'olio con le vernici, e con vari elementi interni del trasformatore. Esso sarà tanto più sentito quanto maggiore è il carico medio che la macchina deve sopportare, quindi in definitiva, l'aumento di acidità è essenzialmente dovuto, oltre alla qualità degli elementi attaccabili dall'olio, alla temperatura della macchina che incide notevolmente sulle reazioni.

Non esistono apparecchi atti ad evitare questo inconveniente, occorre perciò che ogni anno venga verificato il grado di acidità dell'olio in modo da poter intervenire per il cambio, quando i limiti consentiti dalle Norme vengono oltrepassati.

Contemporaneamente alla prova dell'acidità dovrà essere eseguita la prova della rigidità dielettrica dell'olio per accertare se il potere isolante non sia stato diminuito da eventuali infiltrazioni di umidità, o da depositi carboniosi conseguenti eccessive temperature, raggiunte dalla macchina durante il funzionamento.

Come abbiamo visto, questi apparecchi e questi accorgimenti impediscono che si verifichino fenomeni che potrebbero essere causa di guasto; passiamo adesso ad esaminare le apparecchiature necessarie alla limitazione dei danni dovuti ai guasti.

Relè ad espansione di gas

Abbiamo già accennato al *relè ad espansione di gas* e alla sua azione nella macchina. È questo un apparecchio veramente prezioso, in quanto la sua sensibilità ai gas di decomposizione, che accompagnano inevitabilmente ogni tipo di guasto, permette la disinserzione della macchina

quando i danni sono ancora di lieve entità, inoltre denuncia immediatamente eventuali perdite d'olio che, non ovviate, potrebbero causare la formazione d'archi fra le fasi, poichè le distanze isolanti sono calcolate tenendo conto del potere dielettrico dell'olio, molto superiore a quello dell'aria.

Il relè ad espansione di gas (figg. 131-133) è costituito da un vaso posto al di sopra del coperchio e comunicante, per mezzo di tubi, con la macchina e con il conservatore. Nell'interno del vaso uno o più bilancieri, a seconda del tipo, vengono mantenuti in posizione orizzontale dalla spinta idrodinamica dell'olio contenuto nel vaso.

Sui bilancieri sono poste ampolle di vetro alle quali fanno capo due conduttori separati, la cui continuità metallica si produce mediante l'inclinazione dell'ampolla che permette a una goccia di mercurio di portarsi nella zona dove affiorano i conduttori stessi.

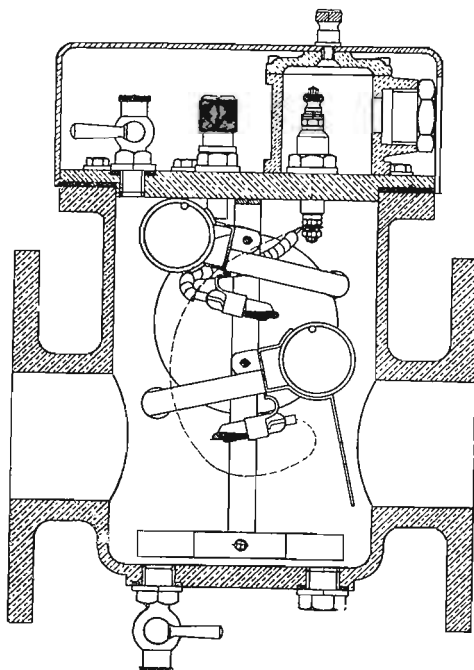



Fig. 131.
Relè ad espansione di gas CEMI (sezione).

Quando nel trasformatore si formano gas di decomposizione, questi si raccolgono nella parte superiore del vaso facendo abbassare il livello dell'olio e modificando l'equilibrio idrodinamico dei bilancieri che inclinandosi, mediante l'azione del mercurio, provocano la chiusura di un circuito. Connettendo i conduttori con il circuito di alimentazione della bobina di apertura dell'interruttore posto sull'alimentazione del trasformatore, questo si apre e distacca la macchina (vedi schema nella fig. 133).

Evidentemente per l'azione descritta occorre un certo tempo che non sarebbe compatibile con l'azione di protezione quando si dovesse veri-

ficare nel trasformatore un grave guasto dovuto, per esempio, ad una sovratensione d'origine atmosferica.

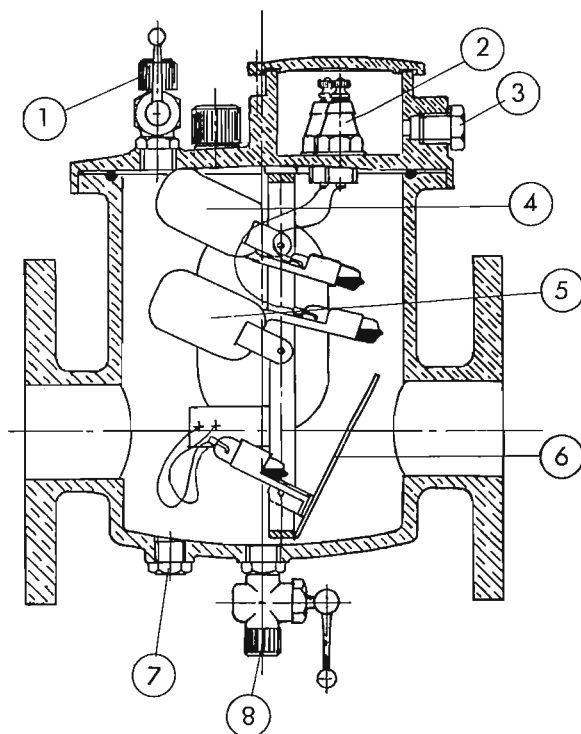



Fig. 132 – Relè ad espansione di gas ASPE (sezione).

1) rubinetto manovrabile per la fuoruscita dei gas; 2) attacchi del circuito elettrico; 3) bocchettone d'uscita per i conduttori; 4) bilanciere d'allarme; 5) bilanciere di funzionamento; 6) paletta per il colpo d'olio; 7) foro filettato di scarico; 8) rubinetto per il trasferimento dei gas nell'eventuale analizzatore.

Onde ovviare questo inconveniente il bilanciere inferiore porta una ventola che occlude parzialmente l'imboccatura del tubo in comunicazione con la macchina. Essa riceve il colpo d'olio conseguente la formazione rapida di gas di decomposizione; la sollecitazione modifica rapidamente la posizione del bilanciere, provocando l'apertura dell'interruttore, molto tempo prima che i gas di decomposizione siano riusciti a far azionare il dispositivo.

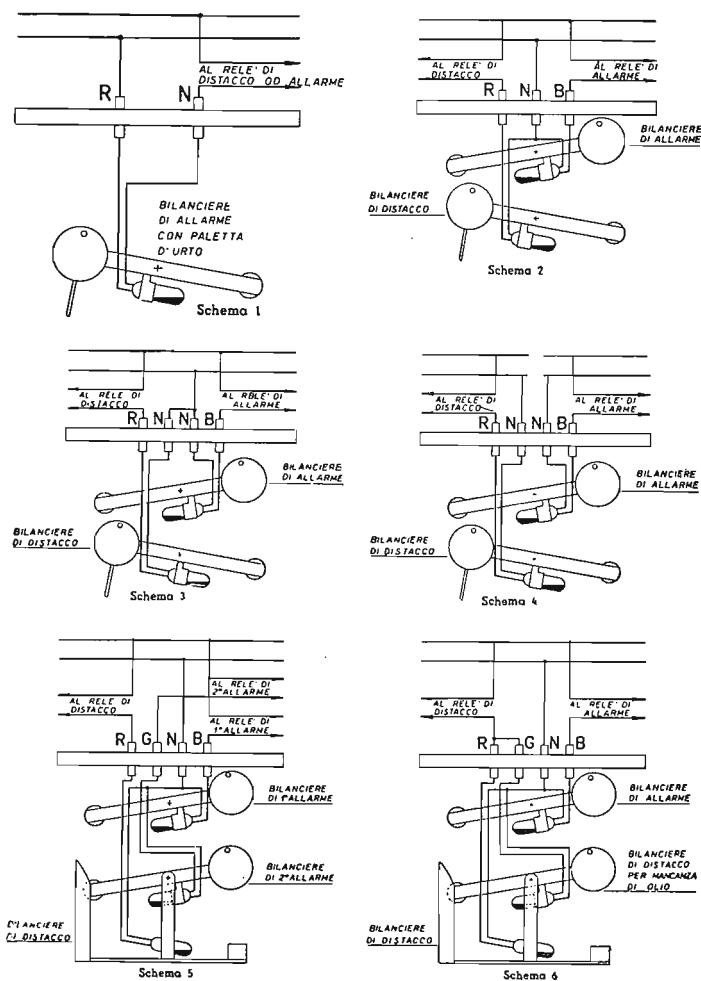



Fig. 133 – Schemi elettrici di funzionamento di un relè ad espansione di gas posto a protezione di un trasformatore.

Quindi, in linea normale, nel relè ad espansione di gas si hanno due bilancieri: uno, quello superiore, aziona generalmente un dispositivo di allarme, mentre l'inferiore chiude il circuito di alimentazione della bobina di apertura (fig. 133).

Protezione differenziale

La *protezione differenziale* esula in certo qual modo dai limiti che abbiamo posto alla trattazione, in quanto viene usata essenzialmente per unità di potenza rilevante e costituisce un onere non indifferente che, nel caso di trasformatori di limitata potenza, supera il risparmio ottenibile dalla limitazione dei guasti, dovuto al suo intervento. Ne diamo pertanto un solo accenno onde completare l'argomento.

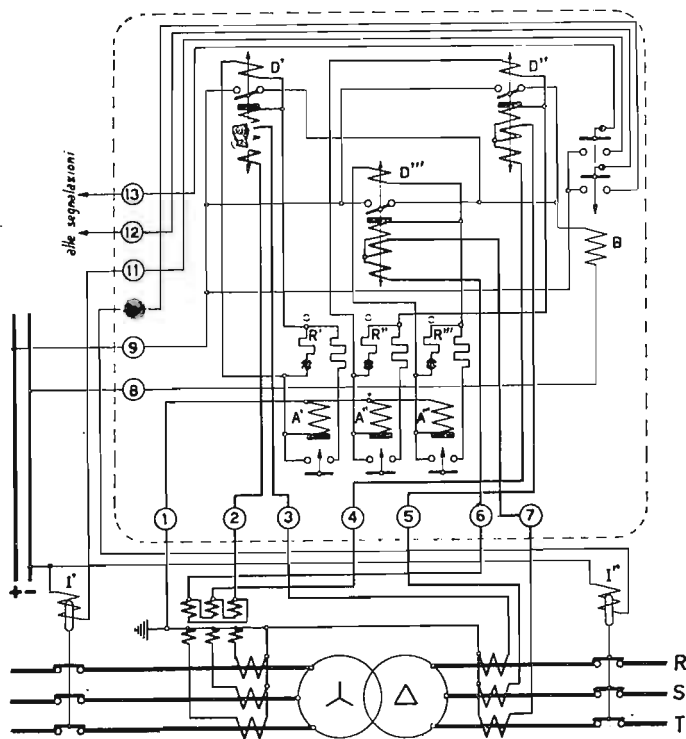



Fig. 134 – Schema di principio di un dispositivo di protezione differenziale.

Chiamasi protezione differenziale un complesso di apparecchiature costruito in modo da portare a diretto confronto, su un relè bilanciato, le correnti relative al circuito primario e secondario del trasformatore.

Qualsiasi guasto provoca uno squilibrio nel valore delle correnti che normalmente stanno fra loro nel rapporto di trasformazione. Lo

squilibrio elettrico agisce sul relè che stabilisce un contatto sufficiente a provocare il distacco della macchina dall'alimentazione.

Come è possibile rilevare anche dallo schema (fig. 134) le apparecchiature occorrenti sono di varia natura, la sensibilità del relè deve essere determinata attraverso tarature che richiedono una competenza non indifferente e l'apparecchiatura comporta, come ripetiamo, un onere tale che il suo uso è riservato solo ad unità di grande potenza, poste in centrali di produzione o in stazioni di trasformazione.

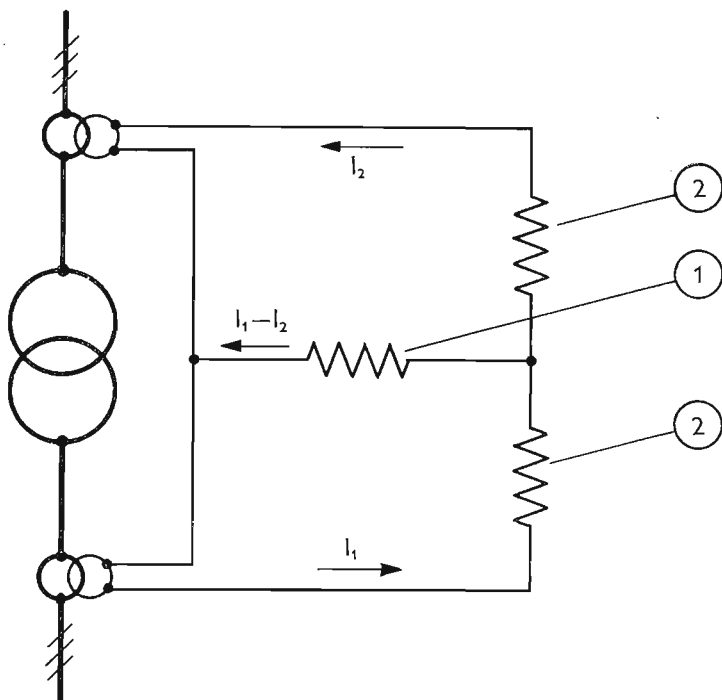



Fig. 135 – Schema di principio di un relè a induzione.

Onde fornire al lettore un'idea più concreta della protezione differenziale riteniamo opportuno descrivere, per sommi capi, la consistenza e il funzionamento di un tipo di queste apparecchiature costruito dalla Compagnia Generale di Elettricità (C.G.E.) che si avvale per la rivelazione delle anomalie di funzionamento di un relè a induzione, costituito da due elettromagneti che assumono, rispettivamente, la funzione di fornire la coppia motrice e la coppia antagonista, agenti su un leggiero disco di alluminio.

La taratura delle coppie sviluppate dai due elettromagneti può essere effettuata regolando la posizione angolare dei poli schermati.

La bobina dell'elettromagnete che fornisce la coppia antagonista viene percorsa dalla corrente addotta dai trasformatori di corrente inseriti sulla linea di alimentazione (fig. 135) e sulla linea d'erogazione, le quali vengono così confrontate continuamente fra loro.

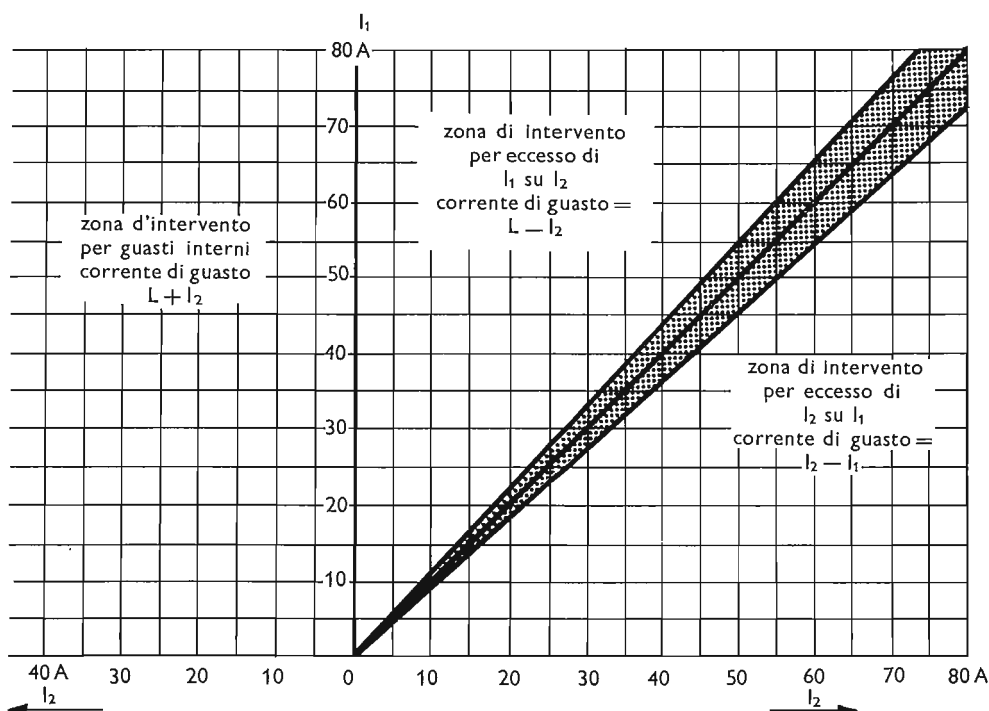



Fig. 136 – Diagramma dei limiti di funzionamento di un relè differenziale a induzione.

Le bobine dell'elettromagnete motore, in condizioni normali d'esercizio, ossia quando I_1 e uguale a I_2 non viene percorsa da corrente e risulta alimentata solo in caso di guasto, cioè quando, in conseguenza di un'anomalia di funzionamento, si manifesta una differenza fra la corrente assorbita dalla macchina e quella erogata.

Il relè interviene quando la differenza fra le due correnti raggiunge un determinato percento della minore fra le due correnti messe in confronto.

Questo valore percentuale si definisce « percentuale caratteristica » del relè. Nel diagramma riportato nella fig. 136 è possibile rendersi conto di quanto abbiamo detto.

Il valore della percentuale caratteristica d'intervento del relè varia dal 40 al 45%, onde ovviare funzionamenti intempestivi conseguenti i transitori di chiusura.

I trasformatori di corrente che alimentano il relè differenziale devono essere collegati fra loro in modo che le correnti di ciascun conduttore di fase, fra loro confrontate, risultino in opposizione per quanto riguarda il relè, in quanto questo è sensibile alla loro differenza, inoltre il collegamento deve essere schematicamente tale da non far pervenire al relè sollecitazioni derivanti da guasti esterni alla macchina.

La prestazione dei trasformatori di corrente deve essere ampiamente prevista, onde non consentire correnti differenziali dovute agli errori di rapporto degli stessi, che si manifestano in modo notevole, nell'eventualità di sovracorrenti conseguenti corto circuiti esterni.

Caratteristiche di funzionamento del relè differenziale per trasformatori

Occorre per prima cosa rilevare che le caratteristiche dei trasformatori di corrente posti a monte della macchina da proteggere sono, in genere, diverse da quelle dei trasformatori di corrente posti a valle, e pertanto i rispettivi rapporti nominali possono risultare imposti da esigenze diverse che non riguardano la protezione differenziale.

Pertanto la bobina antagonista è prevista con varie prese onde compensare le eventuali differenze, oppure porta due serie di morsetti, atti, rispettivamente per il valore di I e per il valore 1,73 I, poichè il caso più frequente di differenza si riscontra quando i trasformatori di corrente, inseriti a monte della macchina, sono collegati a stella, mentre quelli a valle sono collegati a triangolo.

Il relè a induzione è dotato di due contatti normalmente aperti con un polo comune, detti « contatti principali » i quali chiudono direttamente il circuito di alimentazione della bobina di apertura dell'interruttore posto a monte della macchina da proteggere, ed eccitano, in chiusura, un relè a cartellino (fig. 137) per la segnalazione visiva d'intervento.

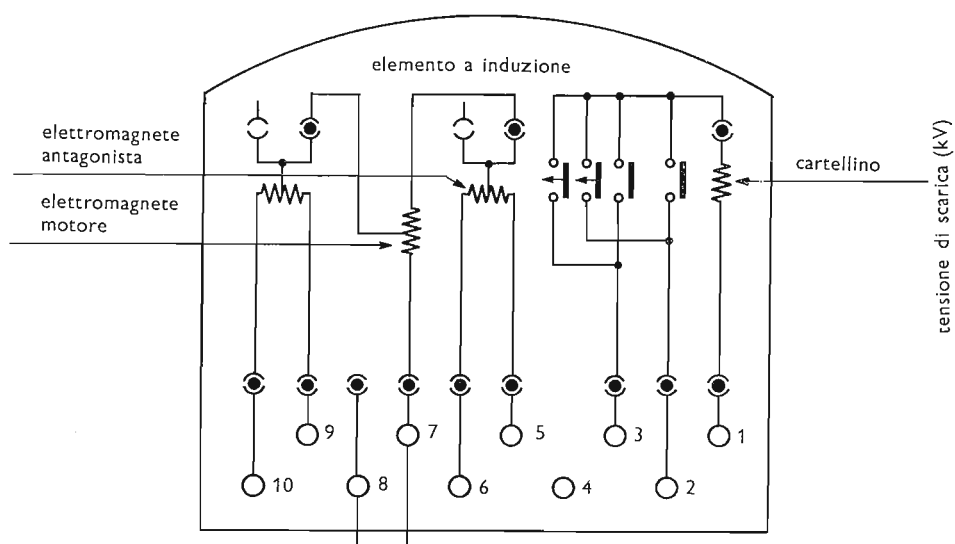



Fig. 137 – Schema di principio di un elemento differenziale ad induzione completo di relè a cartellino.

L'alimentazione del circuito d'intervento della bobina di apertura dell'interruttore deve essere prevista mediante una fonte d'energia indipendente; generalmente ci si avvale di una batteria di accumulatori mantenuta in efficienza da dispositivi di carica a tampone o in full-floating.

PARTE TERZA

MANUTENZIONE E CONDUZIONE DEI TRASFORMATORI

CAPITOLO I

ELEMENTI DI MANUTENZIONE DEI TRASFORMATORI

La manutenzione e la conduzione dei trasformatori non offrono difficoltà di ordine tecnico, esse richiedono solo un'attenta osservazione della macchina che, attraverso vari elementi, denuncia chiaramente le anomalie di funzionamento.

Perdite d'olio

Nel primo periodo di installazione, il trasformatore, sottoposto ad una vibrazione interna continua, si assesta. È specialmente durante questo periodo che si potranno verificare perdite d'olio, generalmente limitate alla guarnizione esistente fra il coperchio e la cassa, e nel premistoppa del commutatore.

L'operatore, a macchina disinserita, provvederà a stringere il dado del premistoppa e ripassare il tiraggio dei bulloni di unione fra coperchio e cassa (fig. 138).

Relè ad espansione di gas

Se nella macchina esiste il relè ad espansione di gas, l'oblò in vetro che consente di vedere il livello dell'olio deve essere mantenuto sempre pulito. Ogni abbassamento di livello dell'olio contenuto va seriamente considerato.

Nei primi giorni di esercizio si raccoglieranno in esso le bolle d'aria contenute nella macchina, sarà sufficiente azionare il rubinetto di scarico dei gas perchè tutto ritorni al normale, ma, passato il primo periodo di funzionamento, l'abbassarsi del livello dell'olio può denunciare l'inizio di un guasto interno o una perdita d'olio dal cassone.

Aprendo il rubinetto di scarico dei gas possono avvenire due cose: l'olio torna a livello, oppure si mantiene al livello assunto.

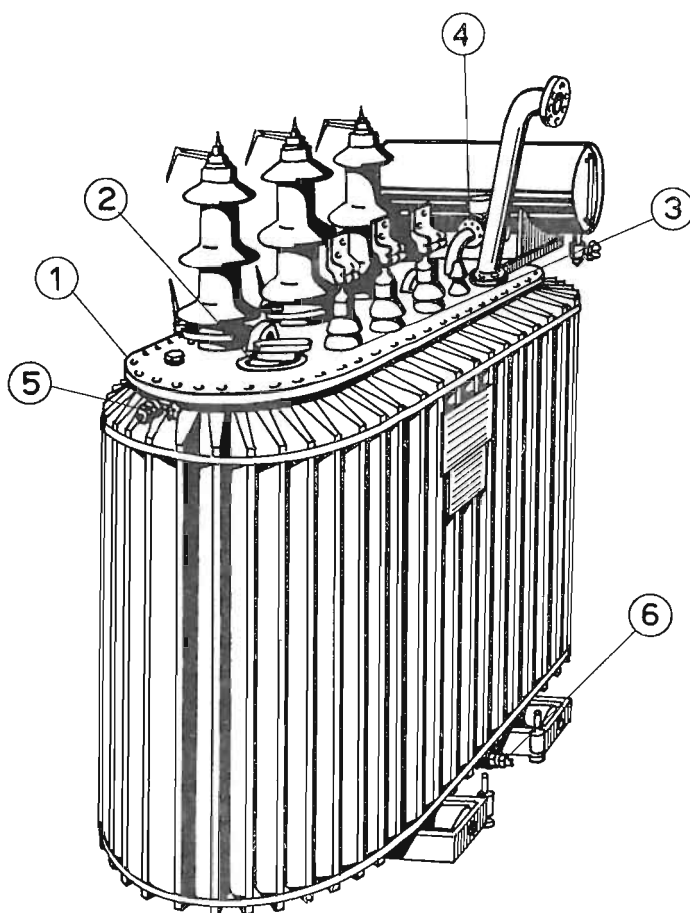



Fig. 138 – Punti d'intervento per l'eliminazione delle perdite d'olio in un trasformatore:

1) guarnizione posta tra cassone e coperchio; 2) premistoppa del commutatore; 3) guarnizioni degli isolatori passanti; 4) guarnizioni del relè ad espansione di gas; 5-6) guarnizione e tappi dei rubinetti.

Se torna a livello occorrerà stare molto in guardia, perchè i gas contenuti nel vaso sono certamente dovuti a decomposizione; se invece rimane dove l'abbiamo trovato, vuol dire che si sono verificate perdite

d'olio che vanno immediatamente individuate e riparate, mentre la macchina deve essere riempita dell'olio mancante.

Nel primo caso l'abbassamento dell'olio si ripeterà a breve scadenza, denunciando chiaramente un'anomalia funzionale interna. Conviene quindi togliere di servizio la macchina e ricercare in essa la causa del guasto prima che esso possa apportare gravi conseguenze.

Osservando il colore dei gas raccolti nel vaso è possibile dedurne l'origine, avremo infatti:

Gas biancastro.

Derivato dalla decomposizione di cotone o carta, indica la carbonizzazione di coperture isolanti delle spire dovute a surriscaldamento conseguente a corti circuiti localizzati.

Gas grigiastro.

Derivato dalla gassificazione del legno o di cartoni, fa pensare all'azione di giunzioni allentate, sui sopporti di legno. L'allentamento e il cattivo contatto possono essere dovuti a saldature male eseguite, o ad autosvitamento dei bulloni di giunzione.

Gas giallastro.

Derivato da bruciature nel ferro, denuncia guasti avvenuti nel nucleo magnetico o interessanti comunque il nucleo stesso.

Gas giallastro contenente fiocchi neri.

È la caratteristica conseguenza della formazione di archi voltaici nell'olio. Evidentemente le distanze isolanti sono state ridotte da azioni elettrodinamiche conseguenti a corti circuiti avvenuti a valle della macchina, o allo sfasciamento di qualche bobina, generalmente quelle di testa, in conseguenza di sollecitazioni dovute ad onde a fronte ripido (sovratensioni da scariche atmosferiche).

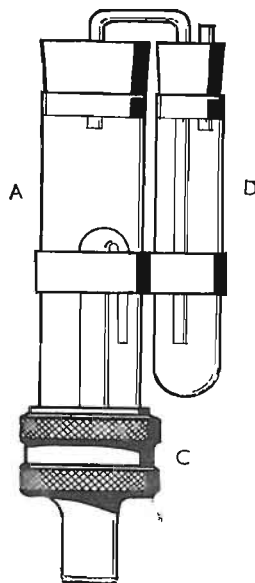



Fig. 139 – Apparecchio analizzatore dei gas contenuti nel relè ad espansione.

È possibile, anche mediante l'uso di un apparecchio analizzatore (fig. 139), determinare la provenienza dei gas di decomposizione facilitando così la ricerca del guasto.

L'apparecchio è formato da due provette di vetro (*A* e *D*) unite con una guarnizione di gomma a sopporto metallico (*C*) adatto ad essere connesso con il rubinetto di scarico dei gas esistente sul relè ad espansione.

Al momento dell'uso le provette vengono riempite con reagenti in dotazione dell'apparecchio e, mediante l'apertura del rubinetto, i gas vengono fatti gorgogliare nelle provette fino ad uscire dal rubinetto di sfogo.

Dal colore dei precipitati che si ottengono, e tenendo presenti le apposite istruzioni allegate all'apparecchio, si potrà sapere se il gas è prodotto da riscaldamenti localizzati nel nucleo, o da carbonizzazione d'isolanti solidi.

La determinazione mediante l'analizzatore costituisce un dato assolutamente sicuro, mentre la valutazione del colore dei gas può sempre risentire del fattore soggettivo.

Temperatura

Ogni variazione di temperatura che non sia dovuta ad aumenti di carico, o all'andamento stagionale, deve essere attentamente controllata ricercandone le ragioni.

Nell'interno della macchina può essere avvenuta infatti l'occlusione dei canali che permettono i moti convettivi dell'olio, per formazioni fangose accumulate sul fondo, o, in macchine di vecchia costruzione, può denunciare un deterioramento dell'isolante interposto fra i lamierini con conseguente aumento delle correnti di Foucault e surriscaldamento della macchina.

L'aumento di temperatura può essere dovuto anche a cause esterne come l'occlusione delle bocche di aereazione.

Essiccatore d'aria

Osservare ogni tanto l'efficienza del gel di silice contenuto nell'essiccatore. Esso deve essere di un blu carico, quando diviene rosa vuol dire che si è saturato di umidità e che quindi non può più svolgere l'azione assorbente.

In questo caso occorre cambiarlo e ripristinarne le qualità igroscopiche, riscaldandolo lentamente su una piastra di lamiera posta a contatto con una fiamma.

Circuito di protezione

Verificare ogni tanto l'efficienza del circuito di protezione agendo sull'apposito pulsante posto sul relè ad espansione di gas, mediante il quale si provocherà l'apertura dell'interruttore posto sulla parte ad alta tensione, e che alimenta il trasformatore.

Rigidità dielettrica e acidità dell'olio

Prelevare almeno una volta all'anno, un campione d'olio (circa un litro e mezzo) facendolo sottoporre, da ditte attrezzate, alla prova di rigidità dielettrica e alla determinazione dell'acidità organica.

Il prelevamento deve essere effettuato dal rubinetto di fondo dopo avere fatto uscire circa 10 litri di olio.

Il contenitore per l'olio destinato alla prova deve essere costituito da una bottiglia di vetro con tappo smerigliato, fatta essiccare in precedenza per almeno 5 ore in un forno a 40 °C di temperatura.

Il tappo, immesso sulla bottiglia alla fine dell'essiccamento va tolto solo al momento dell'introduzione dell'olio.

Qualora la prova di rigidità dielettrica dia valori inferiori a quelli relativi alla macchina (per medie tensioni, 40 kV, con uno spinterometro avente le sfere di 12 mm di diametro, poste a distanza di 5 mm) occorrerà procedere al filtraggio dell'olio.

L'operazione si compie riscaldando l'olio in modo che non oltrepassi gli 80° C, e filtrandolo con l'apposito filtropressa, in modo da ottenere la doppia azione di essiccamento e di depurazione da eventuali depositi carboniosi.

Il trattamento può essere fatto anche mediante centrifughe sotto vuoto.

Il consumo dell'olio, in un trattamento a fondo, deve essere previsto entro il 10% del quantitativo totale.

L'acidità percentuale massima ammissibile in un trasformatore non deve superare il 0,5%. Avendo ottenuto risultati superiori sarà conveniente il cambio completo dell'olio inviando quello acido alla raffineria per la depurazione.

CAPITOLO II

DETERMINAZIONE DI GUASTO NEI TRASFORMATORI

Da quanto è stato precedentemente esposto è possibile rilevare quanto prezioso sia l'apporto del relè ad espansione di gas sulla conduzione del trasformatore, e come, in caso di guasto, esso offra elementi tali da facilitarne la determinazione.

Nei trasformatori in aria la macchina è completamente visibile e quindi le anomalie sono facilmente avvertibili.

Più difficile si presenta la determinazione del guasto in un trasformatore in olio, privo di questo apparecchio.

Nella cabina si riscontrerà aperto l'interruttore posto a monte della macchina sul lato di alta tensione, e, se nonostante le ricerche fatte non saremo riusciti a trovare la causa di ciò, in una deficienza sul circuito di erogazione, occorrerà, prima di richiudere l'interruttore, eseguire le prove necessarie per sondare lo stato interno del trasformatore.

Prove strumentali

Sezionato il trasformatore, ossia staccato completamente dal circuito di alimentazione e da quello di utilizzazione, facendo uso di un ohmmetro (fig. 140) dovremo determinare i valori di resistenza degli avvolgimenti verso massa.

Un morsetto dell'ohmmetro va collegato con la carcassa della macchina, preferibilmente nel punto di attacco con il conduttore di terra. L'altro morsetto va collegato successivamente su tutti i morsetti primari e secondari.

L'indicatore dell'ohmmetro deve segnare « infinito », se la macchina è efficiente, in caso contrario segnerà valore « zero » o prossimo allo zero.

Nel caso che l'indicatore segni « infinito » occorrerà eseguire la prova

di continuità degli avvolgimenti, portando successivamente a contatto, con due morsetti, sia dell'alta che della bassa tensione, i due conduttori che fanno capo all'apparecchio. Se la macchina è efficiente l'indicatore deve segnare zero.

Provando invece fra i morsetti primari e i secondari l'indicatore deve segnare infinito.

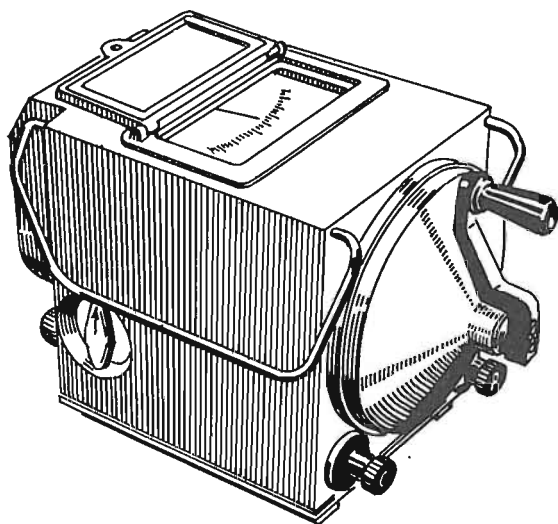



Fig. 140 – Apparecchio misuratore di resistenza (ohmmetro).

Nonostante queste prove, quando dalle indicazioni dell'ohmmetro si potrebbe concludere che la macchina è efficiente, il trasformatore può essere guasto, in quanto, nonostante tutto, possono non essersi verificati contatti verso massa e discontinuità negli avvolgimenti.

Dovremo quindi tener presente che *la prova di un trasformatore effettuata mediante l'uso di un misuratore di resistenza, nelle condizioni descritte, ha valore determinante solo quando, dalle indicazioni dello strumento, si possa ritenere con sicurezza che il trasformatore è guasto.*

Prove sussidiarie

Non avendo ottenuto alcuna indicazione utile dalle prove fatte con l'ohmmetro, conviene ricorrere a una serie di accertamenti che potranno indicare lo stato della macchina:

1) aprire la membrana che occlude la valvola di scoppio; se dal tubo esce fumo la macchina è certamente guasta. Durante questo accertamento occorre tener lontano dall'imboccatura della valvola le fiamme libere esistenti nel locale, candele accese, ecc., in quanto i gas

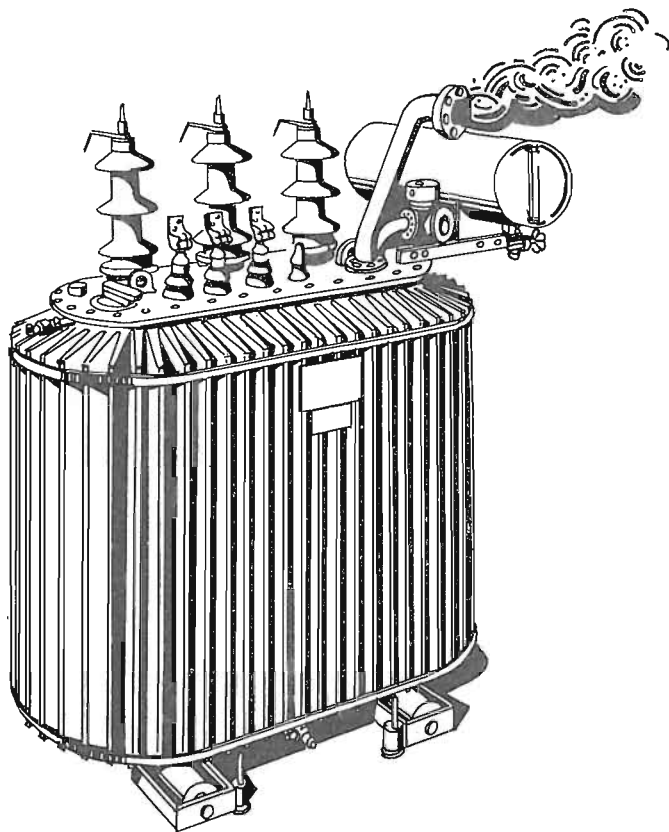



Fig. 141 – Il fumo che esce dalla valvola di scoppio è indice sicuro che il trasformatore è guasto.

di decomposizione sono facilmente infiammabili. Se non si riuscisse a vedere in modo chiaro la fuoriuscita del fumo, portandosi molto vicino all'orificio del tubo, aspirare fortemente con il naso l'aria contenuta nel cassone; rilevando uno spiccato odore di olio bruciato potremo avere un indice sicuro che nella macchina è avvenuto un guasto (fig. 141).

2) avendo a disposizione energia elettrica a bassa tensione sarà opportuno alimentare la macchina dal lato secondario, proteggendosi con valvole fusibili. Se all'atto della chiusura dell'interruttore le valvole fondono, il trasformatore può ritenersi sicuramente guasto.

In questa prova dovremo ricordare che la corrente assorbita a vuoto da un trasformatore di media potenza, 160-300 kVA, si aggira sempre dai 20 ai 40 ampere, essendo molto basso il valore del fattore di potenza, quindi non si commetta l'errore di usare fusibili di portata molto ridotta che potrebbero indurre l'operatore a trarre conclusioni errate (fig. 142);

3) non avendo a disposizione l'energia elettrica a bassa tensione non rimarrà che provare la macchina immettendo in essa la normale tensione d'esercizio.

Sembrerebbe logico che questa prova dovesse avere la precedenza sulle altre, sarà invece buona regola effettuarla quando da tutte le prove esposte non si sarà potuto ottenere un giudizio determinante, in quanto, logicamente, le sollecitazioni che ne derivano rendono più onerose le riparazioni necessarie.

È pertanto opportuno procedere anche per questa prova in modo graduale onde evitare, per quanto è possibile, di aggravare nella macchina la situazione creata dal guasto.

Pertanto la prova va effettuata come segue: predisporre il circuito, tarando i relè dell'interruttore posto sul lato di alta tensione al minimo e chiudere l'interruttore mantenendo aperti i sezionatori posti a monte di esso.

Per chiarezza distinguiamo i sezionatori con i numeri *1-2-3* (vedi schema fig. 143). Si chiuda il sezionatore *1* e se dall'interno della macchina non si odono rumori di scariche, o se al momento della chiusura non si è notato un arco eccessivo, si chiuda il sezionatore *2*. Nel caso che fra le due colonne interessate vi fosse un guasto, l'interruttore si apre.

Fatta questa prima prova e non avendo accertato nulla di anormale, si riapra l'interruttore e i sezionatori, quindi, richiudendo l'interruttore, si passi alla successiva fase della prova.

Si chiuda il sezionatore *3* e il sezionatore *2* e, se tutto risulta regolare, si chiuda il sezionatore *1*, tenendo presente che nonostante tutte le prove fatte l'interruttore può aprirsi alla chiusura dell'ultimo sezionatore se la macchina è guasta.

A quanto abbiamo detto riteniamo opportuno aggiungere due tabelle che pensiamo possano essere di notevole aiuto al tecnico elettricista.

Nella prima (tabella 78) sono raggruppati gli inconvenienti rilevabili su macchine in servizio e i provvedimenti necessari alla loro eliminazione; nella seconda (tabella 79) viene considerata la macchina guasta e attraverso le manifestazioni rilevabili prima del guasto, e la forma che il fenomeno ha assunto nella macchina, si risale alle cause e se ne indicano i rimedi.

Tale tabella potrà evitare che in molti casi la macchina messa in sostituzione di quella avariata ne subisca la stessa sorte.

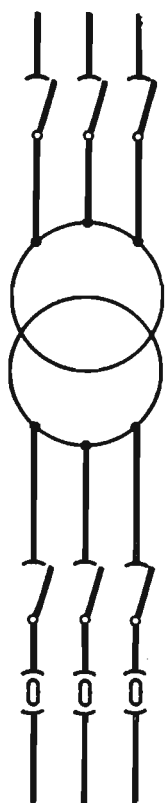



Fig. 142 – Alimentando il trasformatore con una fonte d'energia a bassa tensione, mediante un interruttore con valvole fusibili, se queste fondono il trasformatore è da ritenersi guasto.

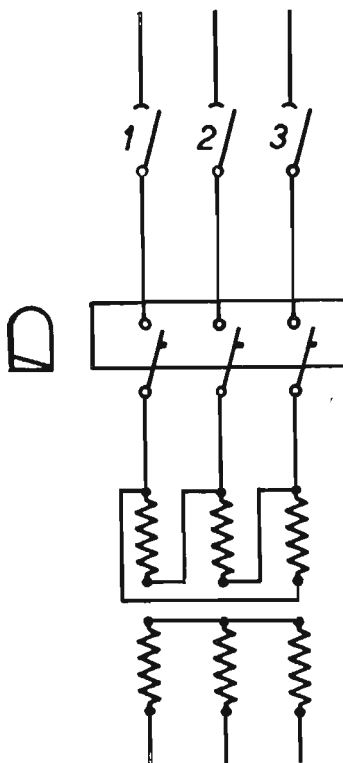



Fig. 143.

Disposizione schematica per la prova del trasformatore supposto guasto, con alimentazione diretta dal circuito a media tensione.

TABELLA N. 78 – **Inconvenienti rilevabili su trasformatori in servizio. Possibili cause e provvedimenti da prendere.**

Inconveniente riscontrato	Possibile causa	Provvedimenti da prendere
Sovrariscaldamento.	Sovraccarico in macchine senza protezione adeguata.	Ridurre il carico e installare protezioni che non permettano alla macchina di funzionare con un sovraccarico continuo maggiore del 10%. Quando non è possibile ridurre il carico, sostituire il trasformatore con un altro di maggiore potenza.
Sovrariscaldamento.	Irregolare distribuzione del carico fra più macchine in parallelo.	Assicurarsi che i trasformatori abbiano uguale tensione percentuale di corto circuito. Se è il caso agire sui variatori di rapporto per ridurre lo squilibrio. L'irregolare distribuzione può essere dovuta alla reattanza dei conduttori di bassa tensione, quando la presa per l'alimentazione dei circuiti utilizzatori sia effettuata lateralmente al banco. Quando è possibile, spostare la presa al centro del banco; se questo non fosse possibile, agire sui variatori di rapporto in modo da ottenere ai morsetti secondari un valore di tensione a vuoto decrescente, partendo dalla macchina più lontana dalla presa comune ($V_1 > V_2 > V_3$).
Sovrariscaldamento.	Carico squilibrato (trasformatori stella/stella *Yy*).	Equilibrare il carico o cambiare le macchine con altre collegate triangolo/stella (*Dy*).

Segue

Seguito tab. 78

Inconveniente riscontrato	Possibile causa	Provvedimenti da prendere
Sovrariscaldamento.	Temperatura ambiente elevata.	Osservare se le bocche di ventilazione non siano state occluse. Migliorare la circolazione dell'aria, o, in casi particolari, ricorrere alla ventilazione forzata.
Sovrariscaldamento.	Depositi sugli avvolgimenti.	Lavare accuratamente la macchina con getti di olio caldo. Dotare il trasformatore degli accessori necessari all'eliminazione dell'inconveniente. (Conservatore d'olio, essiccatore d'aria).
Sovrariscaldamento.	Perdite nel ferro aumentate per deterioramento degli isolanti interposti fra i lamierini.	Il difetto è generalmente rilevabile in trasformatori di vecchia costruzione, per i quali sono state usate lamiere con perdite rilevanti. Nella quasi totalità dei casi conviene eliminare la macchina.
Riscaldamento ineguale fra trasformatori in parallelo, aventi collegamento stella/stella, con neutro a terra sul secondario.	Il difetto è da ricercare nel diminuito grado di isolamento, dovuto a qualsiasi causa, sia in un conduttore di connessione, sia all'interno di uno dei trasformatori.	Sezionare e individuare la parte difettosa. Quando è possibile, evitare la connessione stella/stella, se il neutro debba essere collegato a terra.

Segue

Seguito tab. 78

Inconveniente riscontrato	Possibile causa	Provvedimenti da prendere
Sovrariscaldamenti localizzati nel nucleo.	Correnti parassite nel nucleo magnetico dovute a rotture o a difetti nell'isolamento dei tiranti. Difetti di isolamento fra il giogo e le piastre di serraggio.	Isolare i tiranti ed eliminare le vibrazioni eccessive che sono all'origine del difetto accennato. Isolare le piastre.
Sovrariscaldamenti localizzati nel nucleo.	Correnti parassite causate da contatti tra lamierini adiacenti per difettosa tranciatura.	Il difetto è tra i più rari a riscontrarsi e la riparazione è assai onerosa.
Tensioni di uscita asimmetriche.	Errore di collegamento su una colonna del variatore di rapporto. Nei trasformatori collegati stella/stella il difetto è generalmente dovuto allo squilibrio, anche non eccessivo, del carico.	Controllare i collegamenti. Sostituire il trasformatore con un altro collegato triangolo/stella, dato che non è possibile, nelle reti di distribuzione assicurare in continuità l'equilibratura del carico sulle tre fasi.

TABELLA N. 79 – **Inconvenienti rilevabili su trasformatori guasti e fuori servizio. Loro possibili cause. Interventi consigliabili.**

Tipo	Manifestazioni esterne prima del guasto	Apparenza del guasto	Cause	Rimedi
Olio	Asimmetria delle tensioni secondarie e successivamente forte formazione di gas e intervento delle protezioni.	Una bobina dell'avvolgimento primario si presenta interrotta con asportazione evidente del rame per fusione. L'olio contiene in sospensione particelle carbonizzate e ha un forte odore di bruciato. Osservando bene le altre bobine si noterà in alcune di esse che due spire vicine presentano all'esterno una colorazione più oscura. Non si notano segni di sollecitazioni elettrodinamiche.	L'isolante di copertura del filo costituente l'avvolgimento primario anzichè di cotone o carta è di rayon. Il guasto, in trasformatori a funzionamento normale (70% del carico), si rivela entro un periodo di tempo che va da 6 a 8 anni dalla costruzione. Con carichi minori si noteranno tempi più lunghi.	Smontaggio completo della macchina. Eseguire un lavaggio accurato dell'avvolgimento secondario. Eventuale cambio del cilindro di separazione fra i due avvolgimenti nella colonna guasta. Rifacimento completo dell'avvolgimento primario e cambio dell'olio.
Olio	Idem.	Una o due bobine si presentano nelle condizioni precedentemente descritte. Toccando l'isolante delle altre si nota che è molto facile scoprire il metallo; in qualche punto l'isolante è leggermente sfilacciato.	Isolante in cotone attaccato dall'acidità dell'olio che si rivelerà, alla prova di controllo, oltre i limiti consentiti.	Idem.

Olio	Idem.	Una bobina presenta una o due spire interrotte per fusione. Tutto il restante avvolgimento è in condizioni perfette.	Difetto di isolamento fra spira e spira dovuto alla costruzione. Se il guasto non si rivela al collaudo, il trasformatore può resistere da uno a due anni. In trasformatori più anziani il difetto può essere causato da forti sollecitazioni elettrodinamiche dovute a corto circuiti esterni sulla bassa tensione.	Rifacimento della bobina guasta. Lavaggio della macchina e trattamento dell'olio.
Olio	Intervento dei relè magnetici (protezione da corto circuito).	Gli avvolgimenti si presentano completamente normali. Nessun segno di guasto. L'olio ha un leggero odore di bruciato. Non vi sono tracce di rame fuso in nessuna parte della macchina. Provata a tensione ridotta fuori olio non dà segno di guasto. Rimessa in cassa e provata con tensione trifase crescente in modo graduale, a circa 3/4 del valore nominale, la corrente assorbita sale rapidamente facendo intervenire le protezioni.	Fenomeni di carbonizzazione filiforme nella piastra o nel tubo di bachelite che porta i contatti del commutatore. Fenomeni di carbonizzazione nei collari.	Cambio della parte guasta.

segue

Seguito tab. 79.

Tipo	Manifestazioni esterne prima del guasto	Apparenza del guasto	Cause	Rimedi
Aria	Idem.	Idem.	Fenomeni di carbonizzazione filiforme nel legno paraffinato che porta i morsetti dell'alta tensione e i morsetti del variatore di tensione	Togliere la tavola immettendo tre isolatori sull'arrivo dell'alta tensione. Portare i morsetti del variatore di tensione al centro delle colonne primarie su piastre di bachelite separate (una per fase).
Olio	Idem.	La macchina si presenta totalmente annerita. Alcune bobine non hanno più isolante e il rame è completamente visibile. L'olio contiene forti quantità di corpuscoli carbonizzati. Nel fondo della cassa è depositata una fanghiglia nera. Evidenti segni di sollecitazioni elettrodinamiche dovute a corto circuito.	Guasto dovuto a sovraccarico prolungato. Gli isolanti si sono lentamente carbonizzati fino alla completa distruzione	Rifacimento completo (o demolizione).
Olio	Intervento dei relè magnetici (protezione da corto circuito).	La macchina presenta gli stessi fenomeni, ma in minor misura del caso precedente. Sulle bobine inferiori si nota un rivestimento a efflorescenza di colore marrone.	La macchina è stata sottoposta per lunghi anni a forti variazioni di carico e non essendo dotata di essiccatore d'aria le molecole dell'olio venute a contatto con l'aria	Trattandosi in generale di macchine molto anziane non è consigliabile la riparazione.

		Sul fondo un forte deposito di fanghiglia dello stesso colore.	umida si sono ossidate cadendo sul fondo e depositandosi sulle bobine. Il deposito così formatosi ha impedito il raffreddamento.	
Olio	Idem.	La macchina presenta esternamente la carbonizzazione completa del bocchettone di uscita dei morsetti di bassa tensione (legno trattato). All'esame visivo l'avvolgimento di alta tensione è integro. L'isolamento fuori cassa è ottimo, una volta escluso il bocchettone carbonizzato. Gli attacchi delle uscite di bassa tensione sono anneriti e ossidati.	Allentamento spontaneo dei bulloni di serraggio degli attacchi di bassa tensione con conseguente surriscaldamento e carbonizzazione del morsettone in legno.	Ravvivare gli attacchi e sostituirli se avariati. Rifare completamente il coperchio con passanti unificati e conservatore di olio.
Aria	Idem.	La macchina ha subìto un principio d'incendio. Il rame dell'avvolgimento primario è completamente scoperto. Nel tipo ad avvolgimento continuo si sarà portato la parte inferiore.	La macchina si è guastata per sovraccarico prolungato.	Non è consigliabile la riparazione.
Aria	Idem.	La macchina presenta evidenti segni di fusione nella parte affacciata internamente alle colonne. Le bobine di testa sono rovesciate verso l'esterno del nucleo. I collegamenti dell'avvolgimento primario sono fusi e staccati.	*a*) Sovratensione da scarica atmosferica o onda di tensione dovuta ad un guasto sulla rete di alimentazione, con formazione d'arco fra le bobine affacciate e conseguente corto circuito.	Rifacimento delle bobine guaste. Cambio dei collari anche se non presentano nulla di anormale.

segue

Seguito tab. 79.

Tipo	Manifestazioni esterne prima del guasto	Apparenza del guasto	Cause	Rimedi
			b) Stillicidio di acqua dal soffitto che ha provocato una deficienza di isolamento. *c*) I topi rosicchiando gli isolanti hanno provocato il corto circuito.	
Olio	Idem.	La macchina ha le bobine di testa rovesciate verso l'alto in seguito a corto circuito interno. Gli avvolgimenti sono immersi in una poltiglia marrone nella quale si notano molti pezzetti bianchi. Nel fondo della cassa molto fango di aspetto simile. La parte inferiore del coperchio appare fortemente intaccata con crateri distribuiti, della profondità di 3 o 4 mm.	Si tratta di una macchina in olio senza conservatore. Il cuscinetto d'aria umida che si forma ad ogni diminuzione del carico, fra il coperchio e l'olio, ossida la parte inferiore del coperchio, che ridotta in polvere cade sugli avvolgimenti fino a diminuire le distanze di isolamento e provocare il corto circuito. I pezzi bianchi nella poltiglia marrone sono dovuti al distacco del cementante dei passanti, per la stessa causa.	Se la macchina non è molto anziana sarà conveniente eseguire la riparazione lavandola accuratamente. Sarà necessario il cambio del coperchio e la installazione del conservatore.
Olio	Idem.	La macchina si presenta con numerose bobine dell'avvolgimento di alta tensione completamente sfasciate, le bobine di testa rovesciate verso i gioghi, le squadrette e i collari rotti. I collegamenti primari sono fusi.	La macchina ha subito una fortissima sollecitazione dovuta ad una scarica atmosferica. Occorre esaminare attentamente il nucleo magnetico e la cassa in quanto in in molti casi sono deteriorati dall'arco interno.	Rifacimento completo dell'avvolgimento di alta tensione. Cambio dei cilindri e dei collari anche se apparentemente in buono stato. Nella cabina dove è avvenuto il guasto installare scaricatori di sovratensione con livello di protezione adatto al

PARTE QUARTA

I CIRCUITI AUSILIARI E I CIRCUITI DI TERRA

CAPITOLO I

I CONDUTTORI E LE APPARECCHIATURE PER I CIRCUITI AUSILIARI

Abbiamo finora parlato delle funzioni dei circuiti ausiliari che svolgono il compito di protezione dei trasformatori senza indicare come, in effetti, questi debbano essere costruiti.

In genere si usano cavetti pluripolari con copertura in neoprene la cui sezione deve essere sufficientemente dimensionata per le correnti previste durante il funzionamento delle protezioni.

Nella maggior parte delle cabine il valore delle correnti è minimo, e per di più il tempo nel quale esse circolano nei conduttori è brevissimo, non sono quindi da temere fenomeni di sovraccarico e la sezione dei cavi viene in genere limitata a 1 mm^2.

Questa limitazione, che può sembrare eccessiva, tiene conto di una disposizione schematica non usuale nei circuiti elettrici. Infatti, negli schemi relativi alle protezioni non si notano apparecchiature a limite funzionale come valvole fusibili o interruttori automatici, inibiti dalle disposizioni normative, in quanto agirebbero su circuiti a funzionamento occasionale e del cui intervento gli operatori potrebbero difficilmente rendersi conto, con il risultato d'invalidare le protezioni predisposte.

In queste condizioni manca ai circuiti ausiliari la protezione da corto circuito, e quindi opportuno limitarne al minimo la sezione in modo che, nel caso si dovesse verificare questa eventualità, venga raggiunta in poco tempo la temperatura di fusione dei conduttori, con effetti visibili anche all'esterno della guaina di protezione.

Seguendo questo concetto è opportuno che i cavetti, facenti parte dei circuiti ausiliari, vengano posati completamente in vista, evitando qualsiasi vicinanza con eventuali materiali combustibili, in modo che,

gli addetti alla manutenzione, abbiano la possibilità di rilevarne, a vista, le eventuali anomalie.

Fanno eccezione a questa regola i circuiti derivati da eventuali trasformatori riduttori di tensione (TV) che devono essere protetti con valvole fusibili, onde non provocare gravi danni all'avvolgimento della macchina, qualora dovesse avvenire un corto circuito.

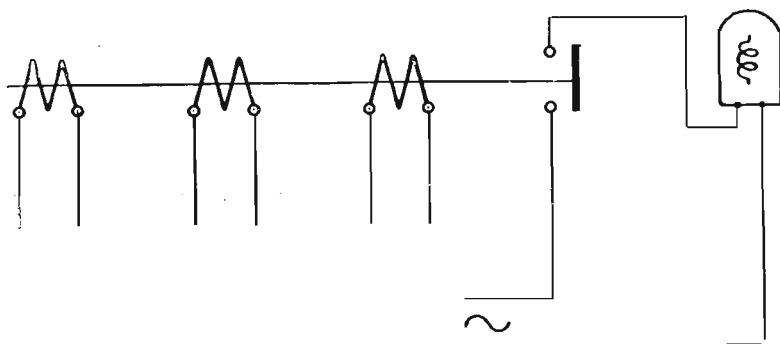



Fig. 144 – Schema di principio di un relè di sbarramento.

Quando nella cabina dovessero essere installati più trasformatori, con la formazione di un banco di parallelo, i conduttori, provenienti dalle singole protezioni, destinati ad agire su un unico apparecchio, come la bobina di apertura dell'interruttore automatico posto sulla parte media tensione a monte dei trasformatori, devono far capo a un relè di sbarramento, costruito in modo da mettere a disposizione di ogni macchina una bobina separata, sufficiente da sola al funzionamento del relè che, una volta eccitato, dovrà chiudere il contatto necessario per l'azionamento della bobina di apertura (fig. 144).

Si ottiene così l'assoluta separazione metallica delle macchine, ovviando al pericolo che potrebbe derivare agli operatori che dovessero intervenire per manutenzione su una delle macchine componenti il banco, in seguito al funzionamento delle protezioni su un trasformatore rimasto in esercizio.

Il relè di sbarramento può essere munito di cartellini indicatori, per facilitare la individuazione della macchina che ha provocato l'intervento delle protezioni.

Accorgimenti da usare nei circuiti ausiliari derivati da trasformatori di corrente e di tensione

Nelle cabine di trasformazione possono essere installati trasformatori riduttori di corrente e di tensione per il funzionamento di strumenti di controllo (amperometri, voltmetri e wattmetri) o per eventuali relè indiretti di tipo amperometrico wattmetrico o varmetrico.

Nella progettazione dell'impianto è necessario che il progettista tenga conto della prestazione prevista per questi apparecchi, in quanto il grado di precisione, relativo alla classe scelta, può essere infirmato quando l'assorbimento degli strumenti o delle apparecchiature alimentate oltrepassa i limiti della prestazione.

Le Norme CEI definiscono come prestazione di un trasformatore per misure, il numero dei voltampere richiesti dal circuito esterno, e suddividono i trasformatori di tensione e di corrente in quattro classi relative al grado di precisione che viene definito dai limiti d'errore di rapporto e d'angolo.

Nelle tabelle 80 e 81 abbiamo riportato i valori di errore massimi ammessi dalle Norme CEI in funzione della classe di appartenenza.

TABELLA N. 80 – **Errori massimi ammissibili nei trasformatori di tensione in funzione della classe di appartenenza.**

Classe	Percentuale della tensione primaria nominale applicata	Errore di rapporto %	Errore d'angolo	
			espresso in minuti	espresso in centiradianti
S	80÷120	± 0,2	± 10	± 0,3
P	80÷120	± 0,5	± 20	± 0,6
Q	80÷120	± 1	± 40	± 1,2
R	80÷120	± 1	nessuna prescrizione	

TABELLA N. 81 – **Errori massimi ammissibili nei trasformatori di corrente in funzione della classe di appartenenza.**

Classe	Percentuale della corrente nominale applicata	Errore di rapporto %	Errore d'angolo	
			espresso in minuti	espresso in centiradianti
S	10	± 0,5	± 20	± 0,6
	20	± 0,35	± 15	± 0,45
	100	± 0,2	± 10	± 0,3
	120	± 0,2	± 10	± 0,3
P	10	± 1	± 60	± 1,8
	20	± 0,75	± 40	± 1,2
	100	± 0,5	± 30	± 0,9
	120	± 0,5	± 30	± 0,9
Q	10	± 2	± 120	± 3,6
	20	± 1,5	± 80	± 2,4
	100	± 1	± 60	± 1,8
	120	± 1	± 60	± 1,8
R	10	± 2	nessuna prescrizione	
	20	± 1,5		
	100	± 1		
	120	± 1		

Criteri di scelta dei trasformatori di misura

Quando il progettista deve scegliere i trasformatori di misura è necessario che ne determini la classe e la prestazione in funzione del grado di precisione che intende ottenere, tenendo conto che, l'errore di rapporto, influisce nella misura introducendo nel metodo un errore percentuale di valore uguale a quello dell'errore di rapporto, mentre l'errore d'angolo introduce nel sistema di misura un errore calcolabile dal prodotto dell'errore d'angolo, espresso in centiradianti, per la tangente dell'angolo di fase esistente fra la corrente e la tensione nel circuito di misura.

Per il calcolo della prestazione è necessario tener conto del consumo proprio degli strumenti o degli apparecchi alimentati e dell'impedenza creata dalle connessioni fra il trasformatore e lo strumento.

TABELLA N. 82 – **Valore degli autoconsumi medi di strumenti di misura di uso normale.**

Strumenti da quadro o portatili Classe 1 e 0,5	Assorbimento in VA a 50 p/S di frequenza		
	Circuito amperometrico (1 A)	Circuito amperometrico (5 A)	Circuito voltmetrico (100 V)
Amperometri elettrodinamici	2,5	2,5	
Amperometri elettromagnetici	2,5	2	
Amperometri registratori ...	6,5	5,5	
Voltmetri elettrodinamici ..			3,5
Voltmetri elettromagnetici ..			3
Voltmetri registratori			10
Wattmetri elettrodinamici (per equipaggio)	4,5	3,5	4
Wattmetri registratori (per equipaggio)	6,5	3,5	6
Frequenziometri a lamelle .			3,5
Frequenziometri a indice ..			15
Frequenziometri registratori .			23
Fasometri	4,5	4	3,5
Contatori a induzione:			
contatore monofase		0,45÷0,6	2,6÷3
contatori doppio monofase (per elemento)		1÷1,5	3,5
contatori trifase (per elem.)		0,35÷0,45	3,5

Il progettista deve ricordare, nel caso che i trasformatori di misura venissero sottoposti ad una prestazione doppia di quella ammessa per la classe di appartenenza, che il grado di precisione della misura scenderebbe a quello appartenente alla classe immediatamente seguente quella scelta.

Le relazioni che permettono di calcolare l'impedenza massima nel circuito secondario di un trasformatore di corrente, o minima per il circuito secondario di un trasformatore di tensione sono:

Trasformatori di corrente

$$Z = \frac{VA}{A^2}$$

TABELLA N. 83 – **Assorbimento espresso in VA, per metro lineare, in funzione della sezione per i cavetti di collegamento in rame, fra i trasformatori di misura e gli strumenti.**

Sezione (mm²)	Assorbimento per metro lineare	
	Corrente massima 1 A (VA)	Corrente massima 5 A (VA)
1	0,037	—
1,5	0,024	0,6
2	0,018	0,44
2,5	0,014	0,36
3	0,012	0,30
5	0,072	0,18
6,3	0,064	0,16
10	0,0036	0,09

Trasformatori di tensione

$$Z = \frac{V^2}{V\,A}$$

nelle quali con $V\,A$ è indicato il valore della prestazione, rilevabile dalla targa, con A il valore della corrente secondaria quando al primario venga applicata la corrente nominale, e con V il valore della tensione secondaria quando al primario venga applicata la tensione nominale.

Per una prestazione di 50 VA a cos $\varphi = 0{,}8$ i valori massimi d'impendenza per trasformatori di corrente, e minimi per trasformatori di tensione, necessari onde non oltrepassare i limiti di funzionamento sono:

— trasformatori di corrente 2 ohm
— trasformatori di tensione 200 ohm.

Nella tabella 82 abbiamo riportato gli autoconsumi medi degli strumenti portatili e dei contatori a induzione, mentre nella tabella 83, in funzione della sezione, abbiamo indicato gli assorbimenti dei cavetti in rame, normalmente usati per i collegamenti fra i trasformatori e gli strumenti.

CAPITOLO II

CIRCUITI PER LA MESSA A TERRA DEI TRASFORMATORI

Il collegamento con il circuito di terra delle masse dei trasformatori non offrirebbe alcun spunto a chiarimenti, qualora ci limitassimo a considerare il puro collegamento, che, in genere, viene effettuato con conduttore in rame della sezione minima di 50 mm².

Essendo però il volume dedicato anche ai progettisti d'impianti elettrici, riteniamo opportuno estendere l'esame del problema a tutto l'impianto di terra della cabina di trasformazione in relazione all'impianto di terra per la protezione degli operatori delle tensioni di contatto che, a norma di legge, dovrà essere costruito anche nella parte destinata all'utilizzazione dell'energia elettrica.

Secondo le Norme CEI il valore della resistenza di terra in una cabina di trasformazione deve essere commisurato in modo da drenare verso terra la massima corrente transitoria di terra possibile nell'impianto di alimentazione, e deve avere una resistenza di terra tale per cui, qualunque sia la deficienza che si verifica nell'impianto, le tensioni di passo e di contatto non devono superare i 65 V.

Lo stesso concetto è espresso, pressappoco, negli articoli compresi nel D. P. R. 547 per la prevenzione degli infortuni sul lavoro e, in genere, si ritiene che per impianti a media tensione senza neutro, o con neutro isolato, sia sufficiente raggiungere, per un'efficace protezione, una resistenza totale verso terra di 5 ohm.

Tale valore è ammesso anche dall'Ispettorato del Lavoro, qualora nella cabina vengano costruite almeno due maglie equipotenziali, per ovviare agli effetti dalla formazione di gradienti pericolosi (fig. 145).

Questo valore è consigliabile in tutti i sensi, e pensiamo che non sia affatto conveniente scendere a valori minori, poichè, agli effetti di una efficace protezione, intesa a non superare i 65 V verso terra, anche per

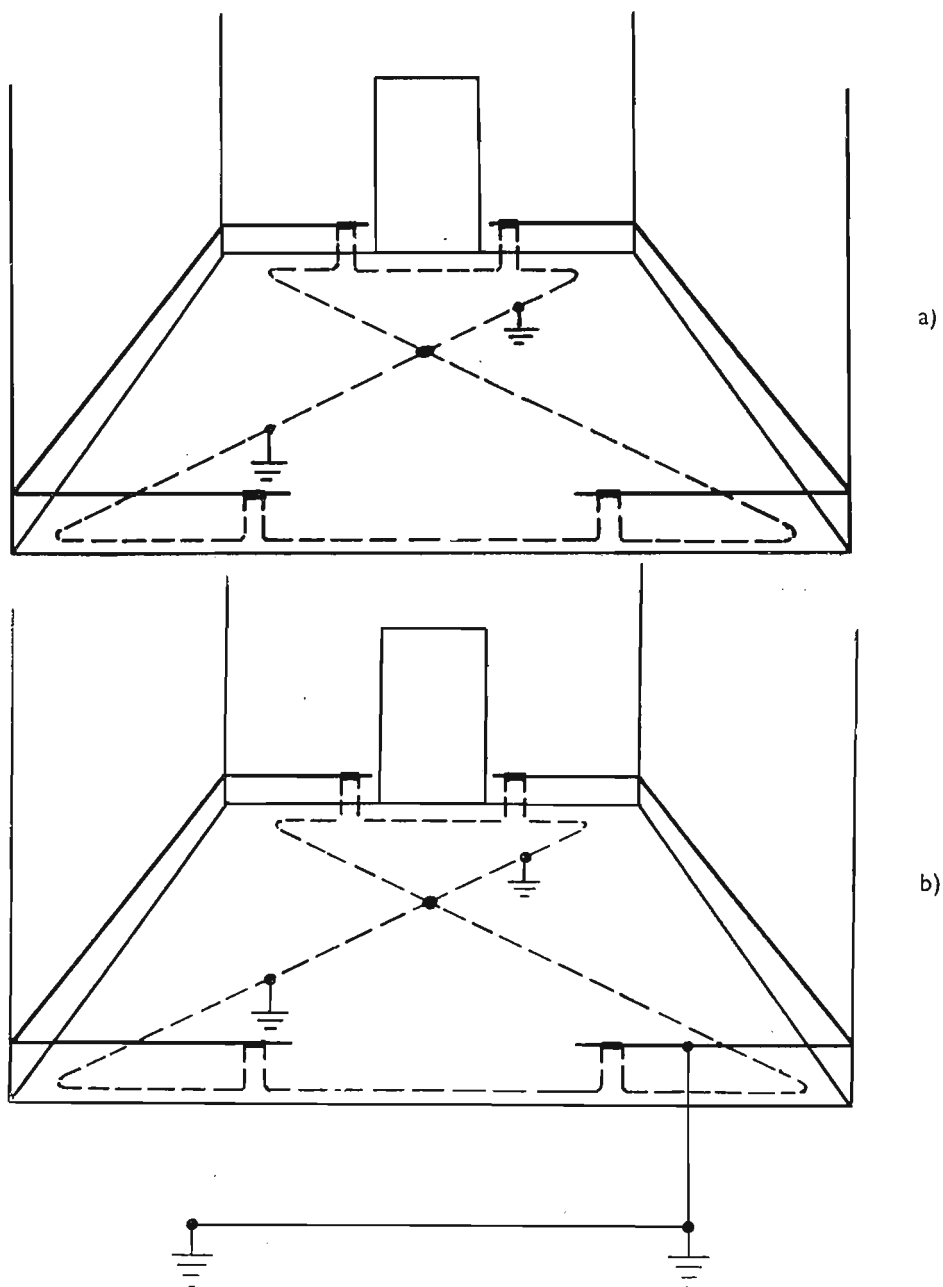



Fig. 145 – Schema e disposizione di una maglia di terra per la creazione di una superficie equipotenziale all'interno di una cabina di trasformazione.

deficienze avvenute nell'impianto utilizzatore, occorre confrontare i valori della resistenza di terra nei vari casi.

Si ottiene una protezione efficiente nel caso di distribuzione a triangolo, o a neutro isolato, sull'impianto di bassa tensione, quando i valori totali di resistenza di terra, nell'impianto della cabina e nell'impianto utilizzatore, sono uguali

$$R_c = R_u$$

(R_c = valore totale della resistenza di terra nella cabina; R_u = valore totale della resistenza di terra per l'impianto di protezione nella parte destinata all'utilizzazione).

Quando invece l'impianto di bassa tensione è previsto per funzionare con il conduttore neutro a terra, (impianti a 380 V) e nel quale il conduttore neutro partecipa alla protezione, e viene collegato metallicamente alle carcasse degli operatori, si ottiene un soddisfacente grado di protezione quando il rapporto fra

$$\frac{R_c}{R_u}$$

è uguale o maggiore di 1,27.

Evidentemente nel caso che il valore totale della resistenza di terra nella cabina, dovesse essere inferiore a 5 ohm, l'onere di costruzione per l'impianto di terra nella parte destinata alla utilizzazione dell'energia elettrica, stante i modesti valori di resistenza che occorrerebbe raggiungere aumenterebbe notevolmente.

Nel caso in cui si voglia usufruire, per la messa a terra del neutro, di un impianto di terra separato da quello della cabina, costituito, per esempio, della tubazione dell'acqua potabile, collegando direttamente il morsetto neutro con la tubazione metallica a monte del contatore idraulico, nel punto di entrata del tubo dalla sede stradale, è necessario pensare che si creano due impianti di terra indipendenti i cui conduttori sono posti a distanza minima.

Infatti sul trasformatore, la cui carcassa è collegata con il collettore dell'impianto di terra della cabina, i due impianti si trovano separati solo dall'isolatore passante del morsetto neutro e sarebbe sempre possibile ad un operatore toccare contemporaneamente i conduttori di collegamento alle due protezioni.

Ciò deve essere evitato nella maniera più assoluta poichè, nel caso di anomalia, toccando contemporaneamente i due conduttori l'opera-

tore costituirebbe un ponte d'unione, attraverso il quale passerebbe una parte della corrente, il cui valore sarebbe tanto maggiore quanto maggiore fosse la differenza di resistenza dei due impianti, ammettendo che la deficienza fosse avvenuta sulla parte a media tensione, la quale suppone, come abbiamo già detto, una resistenza totale di terra di circa 5 ohm, contro le frazioni di ohm risultanti dal collegamento del conduttore neutro con la tubazione metallica dell'acqua potabile.

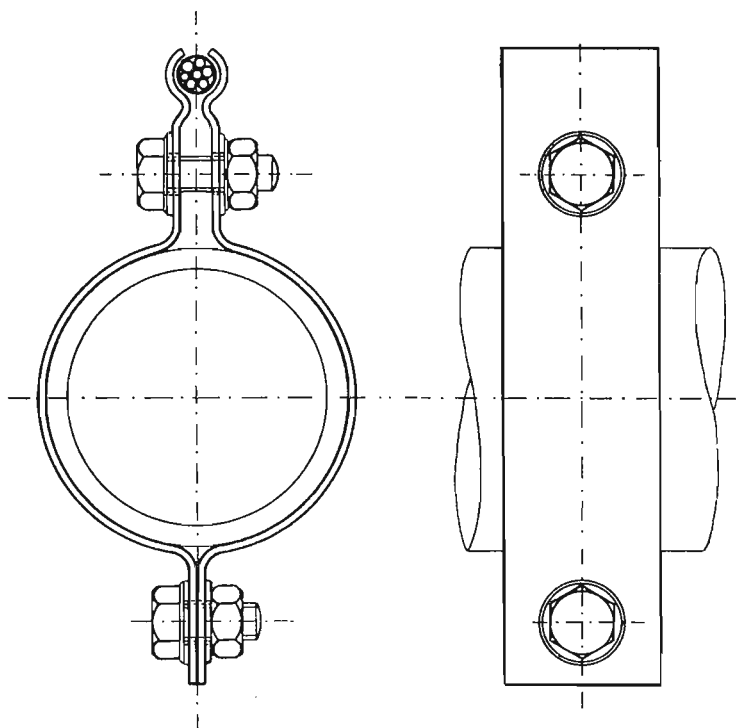



Fig. 146 – Collare per attacco del conduttore di protezione alla tubazione dell'acqua potabile.

Gli inconvenienti possibili con questa disposizione schematica si ovviano, usando per il collegamento a terra del conduttore neutro, cavi unipolari isolati con lo stesso grado d'isolamento scelto per i cavi d'energia a bassa tensione e prevedendo una copertura isolante a cappellotto sul morsetto neutro del trasformatore.

La sezione minima del cavo unipolare da usare per il collegamento del conduttore neutro con la tubazione dell'acqua potabile e di 40 mm²,

quando la distanza da superare non va oltre i 30 m, di 50 o 60 mm² per distanze superiori.

Il collegamento del conduttore alla tubazione si effettua mediante un collare di rame stagnato o cadmiato, la cui forma esterna è riportata nella fig. 146.

È opportuno ricordare che il cavo non deve essere racchiuso entro tubi metallici del tipo Elios ecc., se questi non sono aperti lungo una generatrice, in quanto nell'eventuale funzionamento, per effetto induttivo, il conduttore verrebbe ad assumere un notevole valore di resistenza che infirmerebbe il concetto di protezione.

Il dimensionamento del conduttore di collegamento deve essere previsto con larghezza, poichè, nel caso di contatto verso terra di un conduttore di fase, nel conduttore stesso può transitare un valore di corrente pari a quello della corrente di corto circuito possibile nella macchina (1).

Messa a terra dei trasformatori di corrente e di tensione

Tutti i trasformatori riduttori di corrente e di tensione, eventualmente esistenti nella cabina, devono avere un morsetto del circuito secondario collegato all'impianto di terra, sia per il corretto funzionamento degli strumenti dipendenti, sia per la sicurezza degli operatori.

Infatti in un riduttore di tensione il cui avvolgimento primario è collegato a due conduttori di fase dell'impianto a media tensione, la tensione media verso terra risulta uguale a 0,3 volte la tensione concatenata e allo stesso valore, per effetto elettrostatico, si porta l'avvolgimento secondario e quindi anche gli equipaggi degli strumenti dipendenti.

Il collegamento con l'impianto di terra elimina l'inconveniente e deve essere eseguito con tondo di rame del diametro di circa 6 mm.

Se per esempio, questo collegamento non dovesse essere eseguito, sul secondario di un trasformatore di tensione, alimentato con una tensione di 10 kV, esso si porterebbe per effetto elettrostatico, a circa 3 kV.

Altrettanto si può dire per i trasformatori di corrente, nei quali

---

(1) Per maggiori chiarimenti sugli impianti di terra è consigliabile che il lettore si munisca del manuale: BOSSI-COPPI, « *Impianti di terra* », Edit. Hoepli.

l'avvolgimento secondario si porterebbe, per effetto elettrostatico, ad una tensione pari al valore stellato

$$\left(\frac{V}{\sqrt{3}}\right).$$

È evidente che qualora non venisse eseguito il collegamento con l'impianto di terra, negli strumenti wattmetrici alimentati da riduttori di corrente e di tensione si verrebbero a creare, fra le bobine fisse e quelle mobili, differenze di potenziale notevoli che, oltre a influire sulla precisione della misura, potrebbero determinare scariche sufficienti a ledere l'integrità dello strumento.

La scelta del morsetto di terra, indifferente, nei trasformatori di corrente e di tensione, quando nella cabina non esistano più unità, deve essere fatta in modo da collegare con l'impianto di terra morsetti univoci, onde non creare condizioni di corto circuito.

In genere ci si avvale dei segni più e meno che il costruttore immette nelle vicinanze dei morsetti secondari, ma un controllo eseguito con un voltmetro potrà fornire la sicurezza assoluta.

PARTE QUINTA

IMPIANTI ANTINCENDIO

CAPITOLO I

GENERALITÀ SUGLI INCENDI NEI TRASFORMATORI

Abbiamo descritto, nella parte riguardante l'installazione dei trasformatori, la costruzione dei dispositivi per la raccolta e l'eventuale spegnimento dell'olio contenuto nelle macchine, che la legge prescrive, quando il quantitativo di liquido combustibile supera certi limiti.

Occorre però rilevare che il mezzo deflammante, costituito dai pozzetti di raccolta, si rivela utile solo in uno dei tipi d'incendio che si possono verificare, in quanto la sua azione si esplica solo quando l'olio incendiato esce dal contenitore, caso che, per la verità, è il più frequente.

In genere i tipi di incendio che possono verificarsi nei trasformatori isolati in olio minerale sono i seguenti:

— tipo a lago;
— tipo a torcia;
— tipo misto.

Si ha il tipo a lago quando il contenitore della macchina, sotto le sollecitazioni conseguenti un guasto interno, cede nella parte inferiore, generalmente in corrispondenza delle saldature delle onde di raffreddamento, lasciando uscire la totalità del liquido infiammato.

In questo caso il contenitore deflammante oppone, al dilagare dell'incendio, un'azione pronta ed efficace.

Si ha invece il tipo a torcia quando la fiamma trova vie di uscita nella parte superiore della macchina, eventualità verificabile essenzialmente nei trasformatori privi del conservatore d'olio, e nei quali i morsetti secondari escono dalla macchina attraverso morsettoni di legno trattato.

In questo caso, naturalmente, la fiamma si dirige verso l'alto, e qualora non si intervenga prontamente con mezzi di estinzione, possono

produrvi gravissimi danni agli immobili, eventualmente sovrastanti al locale della cabina.

Il tipo misto d'incendio si verifica quando il contenitore cede verso la parte mediana, producendo, in modo contemporaneo, gli effetti del tipo a lago e del tipo a torcia.

Premesso questo, è naturale che sia da ritenere conveniente prevedere un mezzo di estinzione pronto per ogni eventualità.

MATERIALI ATTI ALLA ESTINZIONE D'INCENDI DI LIQUIDI INFIAMMABILI

I materiali normalmente usati nella estinzione d'incendi che si sviluppano nei liquidi infiammabili sono:

— acqua nebulizzata;

— schiuma chimica o meccanica;

— anidride carbonica (CO_2);

— gli alogenati di metano come il trifluoro bromometano (CF_3B_r), il bromoclorometano (CH_2B_rCl), il tetracloruro di carbonio (CCl_4);

— le polveri.

Prima di entrare nei particolari riguardanti gli incendi che si possono sviluppare negli impianti elettrici, riteniamo opportuno un rapido esame del comportamento dei materiali esposti.

Acqua nebulizzata

L'acqua nebulizzata esercita l'azione di spegnimento attraverso il raffreddamento e il soffocamento.

Il raffreddamento provocato dall'acqua sotto questa forma è particolarmente efficace, in quanto, la velocità di assorbimento di calore è proporzionale alla superficie delle goccioline che si portano a contatto con il fuoco, quindi, tanto è maggiore la nebulizzazione, ossia la suddivisione dell'acqua ottenuta dai nebulizzatori, tanto maggiore è l'azione di raffreddamento.

Anche l'evaporazione dell'acqua è funzione diretta della superficie di contatto ed è evidente che l'acqua nebulizzata sia perciò in grado di produrre una notevole quantità di vapore in un tempo molto ristretto, e con un ritmo tale da sostituirsi all'ossigeno e agire così sul fuoco per soffocamento.

I due effetti descritti sono propri dell'acqua nebulizzata in quanto, qualora si usasse il normale getto d'idrante, l'effetto estinguente si otterrebbe solo per raffreddamento, ossia riducendo la temperatura del combustibile al di sotto della temperatura di accensione.

TABELLA N. 84 – **Valore della corrente rilevata fra gli elettrodi con uso d'acqua nebulizzata in funzione della distanza. Tensione applicata 150 kV.**

Distanza del nebulizzatore dall'elettrodo	Intensità di corrente in milliampere sul nebulizzatore
m 0,5	0,6 mA
m 1	0,28 mA
m 3	0,09 mA
m 5	non rilevabile

Nel particolare riguardo degli impianti elettrici l'acqua nebulizzata offre un'alto grado di rigidità dielettrica, e non dà luogo, anche con tensioni notevoli, ad adescamenti d'arco. Nella tabella 84 sono riportati i risultati di una prova ottenuti con acqua alla pressione di 3 atmosfere e una tensione applicata di 150 000 V.

Schiuma chimica o meccanica

La schiuma si può ottenere chimicamente, mischiando, al momento dell'uso sostanze normalmente separate, la cui reazione dà luogo a formazione di gas con notevole aumento di volume e la conseguente produzione di schiuma stabile.

In via meccanica la schiuma si ottiene agitando, con una turbina, acqua mischiata con prodotti schiumogeni saponosi.

L'azione estinguente è dovuta principalmente alla separazione meccanica del combustibile dall'ossigeno, ottenuta con un effettivo ricoprimento della superficie incendiata mediante un manto di schiuma.

Nei primi istanti si ha anche una certa azione raffreddante conseguente all'acqua contenuta nella schiuma.

Sia la schiuma chimica che quella meccanica possono essere considerate come corpi conduttori, e non possono quindi essere usate sugli impianti elettrici, se non quando si sia assolutamente sicuri che nessuna parte dell'impianto sia rimasta in tensione.

Nel caso contrario gli operatori correrebbero un rischio mortale.

Anidride carbonica

L'anidride carbonica, in forma di gas, esplica l'azione estinguente abbassando la concentrazione di ossigeno e di vapori combustibili nell'aria ambiente, è perfettamente isolante e non lascia traccia, una volta ventilato il locale nel quale ha agito. Non ha inoltre alcuna azione tossica sull'organismo umano, e può essere considerata, insieme all'acqua nebulizzata, come il mezzo più adatto da usare negli impianti elettrici.

Le polveri e gli alogenati

Le teorie esposte per l'azione estinguente esercitata dall'acqua nebulizzata, dalla schiuma e dall'anidride carbonica, non trovano riscontro quando si considerano le polveri estinguenti e gli alogenati.

Gli alogenati in effetti hanno un punto di ebollizione e un calore di vaporizzazione molto modesto, pertanto possono esplicare un certo effetto raffreddante, in forma però talmente ridotta, da potere essere considerato trascurabile.

La polvere, generalmente a base di bicarbonato, per la sua stessa conformazione non può evidentemente creare la minima azione di raffreddamento.

In genere questi due materiali, essendo più pesanti dell'aria, spengono il fuoco in parte per soffocamento, depositandosi sulla superficie infiammata ed escludendone l'ossigeno, ma la loro vera azione consiste in un fenomeno catalitico negativo, riportando il meccanismo di spegnimento ad un'azione chimica che rallenta la velocità di reazione, agendo sui prodotti intermedi della combustione.

Nel caso particolare degli impianti elettrici, sia la polvere che gli alogenati vengono raramente usati, benchè abbiano una rigidità dielettrica notevole.

TABELLA N. 85 – **Comparazione dell'efficacia dei materiali usabili per l'estinzione d'incendi** (Dupont).

Materiale	Efficacia d'azione
Trifluoruro bromometano CF_3Br (Freon)	100
Polvere Dry	66
Bromoclorometano CH_2 Br Cl	45
Tetracloruro di carbonio CCl_4	34
Anidride carbonica CO_2	33

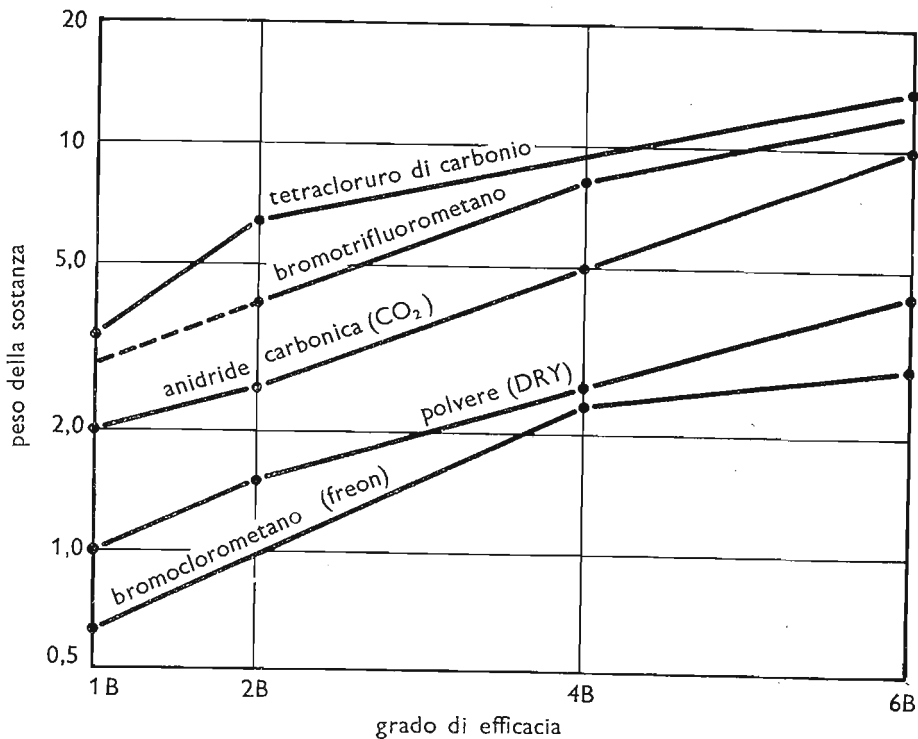



Fig. 147 – Diagramma dell'efficacia d'estinzione di estintori caricati con materiali diversi in funzione del peso del mezzo estinguente.

TABELLA N. 86 – **Concentrazione approssimata necessaria per produrre effetti letali, espressa in parti per milione di cm³ (ppm).**

Mezzo estinguente	Formula	Concentrazione letale approssimata in ppm in volume	
		Sostanza indecomposta (non in presenza di incendi)	Sostanza decomsta (in presenza di incendi)
Freon	$CBrF_3$	832 000 ppm	14 000 ppm
CO_2	CO_2	657 000	—
Bromoclorometano (CB)	CH_2BrCl	65 200	4 180
Tetracloruro di carbonio	CCl_4	28 600	320
Bromuro di metile	CH_3Br	5 900	9 600

Infatti, mentre gli alogenati a contatto con la fiamma tendono a produrre sostanze tossiche, nocive all'organismo umano anche con basse concentrazioni, la polvere, dopo lo spegnimento, deve essere completamente rimossa, causando un notevole ritardo nella ripresa del servizio.

A conclusione di quanto abbiamo detto riportiamo la tabella 85 che fornisce una base comparativa dell'efficacia dei vari materiali considerati nello spegnimento degli incendi, esclusa l'acqua nebulizzata.

La tabella esprime l'efficacia del mezzo considerato a sè stante, ma non corrisponde esattamente all'efficacia effettiva ottenibile quando il materiale viene caricato negli estintori, in quanto l'effetto dipende anche dalla possibilità di ottenere una scarica adeguata del mezzo estinguente.

Nel diagramma riportato nella figura 147 è possibile rendersi conto dell'efficacia degli estintori caricati con materiali diversi.

Sulle ascisse sono riportate le classificazioni 1 B - 2 B ecc. corrispondenti allo stesso grado di classificazione, secondo l'Underwriters

Laboratories, mentre sulle ordinate sono riportati i pesi, espressi in libbre, del mezzo estinguente.

Seguendo l'ordinata corrispondente alla classificazione 2 B, è possibile rilevare che un estintore al tetracloruro di carbonio da 6 libbre, ha la stessa efficacia di un estintore al bromoclorometano da 4 libbre, di un estintore ad anidride carbonica da 3 libbre, di un estintore a polvere Dry da 1,8 libbre, e di un estintore al trifluorurobromometano da 0,9 libbre.

In riferimento all'anidride carbonica e agli alogenati, nella tabella 86 abbiamo riportato il grado di tossicità dei vari mezzi estinguenti rispetto agli operatori.

CAPITOLO II

GLI ESTINTORI

Si definisce « estintore » un contenitore in lamiera d'acciaio nel quale viene immesso il materiale estinguente e un mezzo qualsiasi atto a provocare l'espulsione rapida del materiale dal contenitore, con la possibilità di un'azione a distanza sul punto di incendio.

Il mezzo che fornisce la pressione può essere posto all'esterno del contenitore (bombole d'aria o di anidride carbonica compressa), contenuto nello stesso contenitore (liquidi gas e polveri pressurizzati) o può agire per reazione chimica di due sostanze che vengono mischiate al momento in cui si determina la necessità dell'uso dell'estintore (estintori a schiuma chimica e idrici).

In apparenza un incendio è simile all'altro, quindi i mezzi di intervento dovrebbero essere sempre gli stessi, in realtà invece gli incendi possono essere raggruppati in tre categorie:

1) incendi di materiali combustibili, come legno, carta, stoffa;

2) incendi dei liquidi infiammabili, come idrocarburi, alcool, vernici, oli, ecc.;

3) incendi che si sviluppano su macchine elettriche o comunque in locali dove l'azione dell'estintore può raggiungere parti di impianto in tensione.

È ovvio che se con l'acqua si possono spegnere facilmente i focolai d'incendio dovuti alla combustione di materiali solidi, non si possa dire altrettanto nella combustione di liquidi infiammabili. Essi infatti, avendo un peso specifico minore dell'acqua, galleggiano su di essa e non risentono della sua azione di spegnimento.

Per spegnere questi particolari tipi di incendio è necessario ricorrere a mezzi che esplichino un'azione coprente, getti di sabbia, schiuma, ecc., o che si sostituiscano all'aria e quindi all'ossigeno, impedendo la

combustione, come avviene quando si usa l'anidride carbonica, o l'acqua nebulizzata.

Nel terzo tipo di incendio il mezzo di estinzione deve essere compatibile con l'energia elettrica, pure esplicando l'azione necessaria per lo spegnimento di liquidi infiammabili.

Dalla semplice osservazione dei principali tipi di incendio si rileva la necessità di adeguare il tipo di estintore da installare, al particolare servizio che da esso si richiede.

Tipi di estintori

I tipi principali di estintore che si trovano comunemente in commercio sono:

— estintori idrici;
— estintori a schiuma meccanica o chimica;
— estintori a polvere;
— estintori al tetracloruro di carbonio;
— estintori ad anidride carbonica.

Estintori idrici

Riferendosi al mezzo con il quale si ottiene la pressione necessaria all'espulsione violenta del liquido contenuto nel recipiente e che ne permette l'uso ad una certa distanza dall'incendio, gli estintori idrici si possono dividere in due categorie:

2) estintori idrici a reazione chimica;
2) estintori idrici agenti per liberazione di gas compresso, o per apertura della valvola di un recipiente in pressione.

Appartengono alla prima categoria tutti quegli estintori nei quali la pressione è ottenuta mediante una reazione chimica provocata nell'interno del recipiente al momento dell'uso (fig. 148), alla seconda, tutti quelli nei quali la pressione interna si ottiene liberando un gas compresso, aria od anidride carbonica, che può essere contenuto in una bomboletta la cui apertura è provocata dall'esterno, o immesso direttamente nel recipiente dell'estintore, al momento della carica.

Nel primo tipo, il liquido è formato da acqua, nella quale è stato sciolto un certo quantitativo di bicarbonato di sodio ($NaHCO_3$); una

fiala di vetro contenente acido solforico (H_2SO_4) è posta in alto sotto il percussore.

Azionando questo apparecchio, la fiala si rompe, i due liquidi si mescolano e l'acido solforico reagisce al bicarbonato di sodio dando luogo alla formazione di anidride carbonica (CO_2), che, aumentando rapidamente di volume, mette in pressione il recipiente espellendo il liquido contenuto.

La soluzione emessa dall'estintore, acqua e solfato di sodio (Na_2SO_4), avendo reazione neutra, non danneggia i corpi con i quali viene a contatto, essendo l'acido solforico esaurito completamente nella reazione descritta.

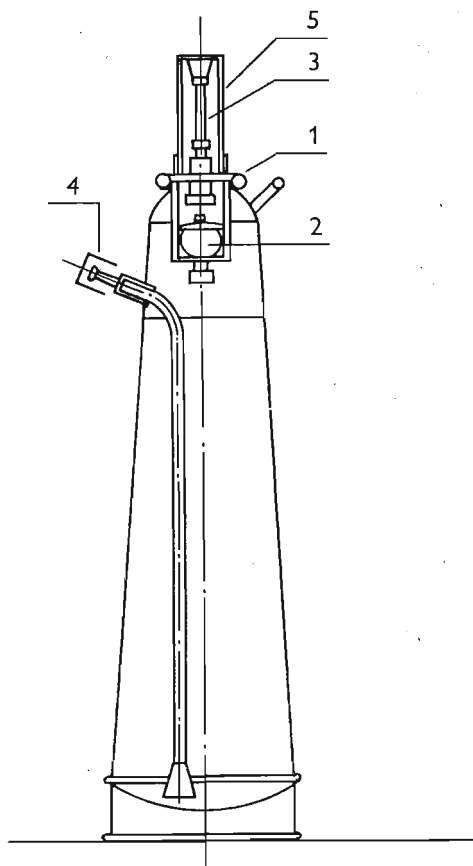



Fig. 148 – Estintore idrico capacità 9 litri, peso 13.200 kg (costruzione Marchetti):

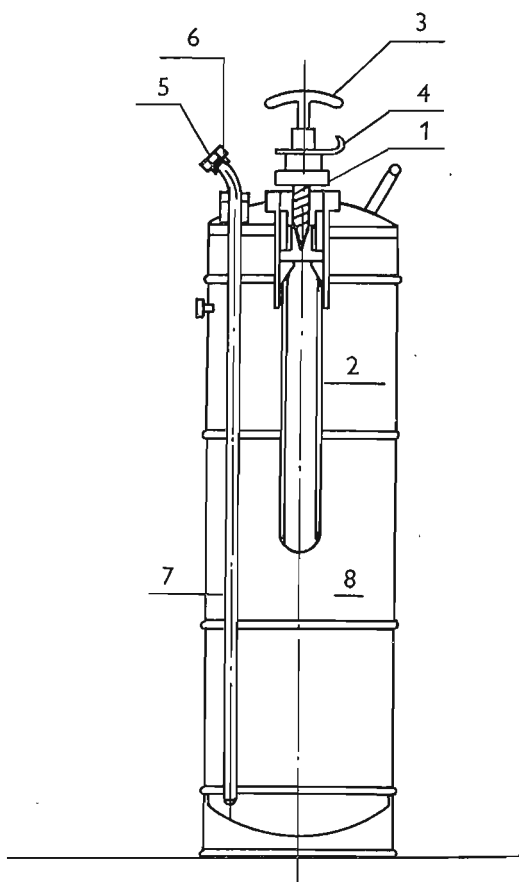
1) dado ad alette per la chiusura del recipiente contenente l'acqua; 2) fiala dell'acido; 3) albero del percuotitore; 4) ugello con relativo coperchio di protezione; 5) gabbia di protezione del percuotitore.

Un tipo di estintore idrico, in uso da molti anni, ha un funzionamento meno complesso, essendo costituito da una soluzione di bicarbonato di sodio uguale a quella già descritta e portante nella parte superiore una piccola bombola di anidride carbonica compressa (figura 149).

Azionando il volantino si provoca la fuoruscita di gas dalla bombola e la messa in pressione del recipiente con la conseguente espulsione del liquido.

L'uso di una soluzione di bicarbonato di sodio e della bomboletta di anidride carbonica, è giustificato dai costruttori con le argomentazioni da noi già espresse per l'azione estinguente delle polveri e degli alogenati.

Un'estintore idrico razionale è il tipo Kidde che, costituito da un recipiente a bombola, adatto a pressioni di 10 atmosfere, dalle pareti interne fosfatizzate per ovviare l'azione ossidante del l'acqua, viene messo in pressione, al momento della carica, con un normale compressore di aria adatto per il gonfiaggio di gomme di auto.

Fig. 149 – Estintore idrico capacità litri 13, peso 19,200 kg (costruzione Marchetti): 1) tappo centrale per la chiusura del recipiente contenente l'acqua; 2) bombola contenente anidride carbonica in pressione; 3) maniglia a vite destinata a forare il coperchio posto a chiusura della bombola contenente anidride carbonica; 4) forcella di sicurezza; 5) ghiera di fissaggio del dischetto di piombo tarato; 6) dischetto di piombo che si rompe sotto la pressione del getto; 7) tubo attraverso cui esce l'acqua; 8) recipiente contenente la soluzione di acqua e bicarbonato.

Un manometro inserito nel manico dell'estintore, fornisce in ogni momento la percezione visiva dello stato di carica dell'estintore stesso (fig. 150).

Impugnando l'estintore e azionando con due dita il grilletto d'apertura si provoca un getto d'acqua nebulizzata che raggiunge, nei tipi più

piccoli, nove metri di distanza dalla bocca d'uscita e distanze maggiori nei tipi a più grande volume.

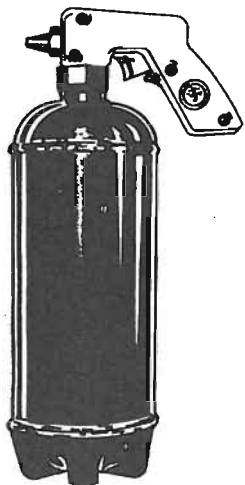
Una particolarità da notare è che l'uso dell'estintore può essere limitato a volontà mediante l'azionamento della valvola d'apertura e non deve perciò essere necessariamente scaricato tutto, come avviene negli altri tipi descritti.

Evidentemente il concetto funzionale degli estintori idrici è semplicissimo e il loro funzionamento sicuro, fin quando gli elementi costitutivi conservano la loro efficienza.

Fig. 150.

Estintore ad acqua nebulizzata, tipo Kidde (costruzione Ciodue). Il manometro inserito nel manico indica lo stato di carica dell'estintore.

Estintori a schiuma

Gli estintori a schiuma sono apparecchi che invece di emettere acqua emettono un grande volume di schiuma densa e persistente che coprendo la superficie incendiata, impedisce all'ossigeno di alimentare la fiamma determinandone così lo spegnimento.

La formazione della schiuma può essere provocata da fattori chimici o da fattori meccanici; e la costruzione degli estintori a schiuma si differenzia nettamente nei due tipi.

L'estintore a schiuma chimica è costituito da due recipienti posti uno nell'interno dell'altro e i cui contenuti sono separati da chiusure ermetiche.

Nel recipiente più grande si ha in generale una soluzione di solfato d'alluminio ($Al_2(SO_2)_4$) e nel più piccolo, posto nell'interno, una soluzione di acqua e bicarbonato di sodio ($NaHCO_3$) al quale è stata aggiunta una sostanza allo stato colloidale.

Al momento dell'uso, manovrando un volantino posto all'esterno dell'apparecchio, si provoca l'apertura del recipiente interno e, rovesciando l'estintore, si fa in modo che i due liquidi si mescolino (figura 151 *a* 151 *b*).

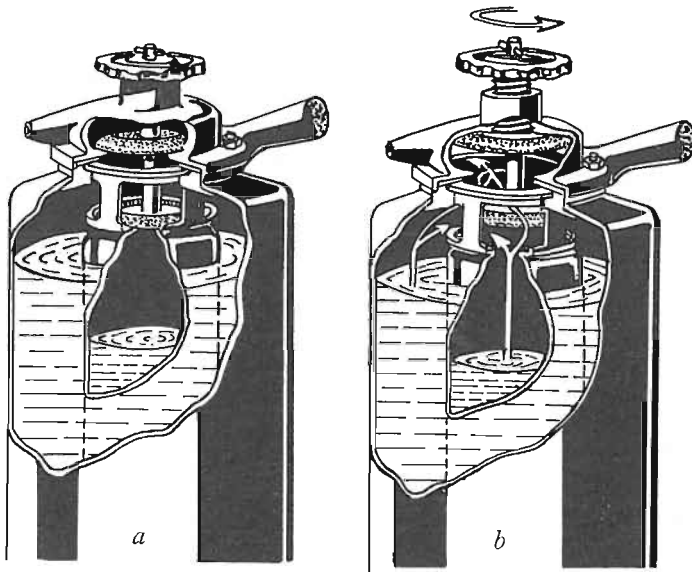
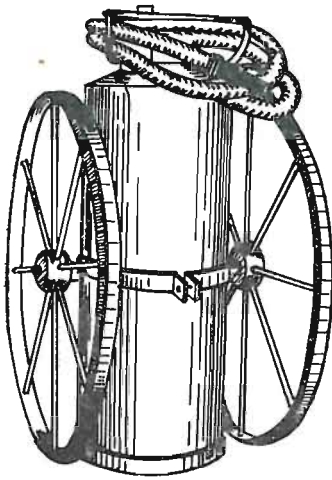



Fig. 151 – Sezione di un estintore a schiuma chimica (Bergomi): *a*) estintore in posizione di riposo; *b*) estintore in posizione di lavoro.

La reazione chimica conseguente dà luogo ad una formazione di anidride carbonica (CO_2) che, mettendo in pressione il recipiente, spinge all'esterno il liquido divenuto fortemente schiumogeno, che esce in forma di schiuma densa.

Nella fig. 152 è riportata la vista esterna di un estintore a schiuma chimica.

Fig. 152.
Estintore a schiuma montato su carrello.

Negli estintori a schiuma meccanica si ripete grosso modo ciò che avviene nell'estintore idrico a compressione, con la variante che il li-

quido è costituito da una soluzione contenente un sapone generalmente ottenuto con alcoli superiori (fig. 153).

Nella bocchetta d'uscita, una piccola turbina, messa in movimento dallo stesso getto provvede alla produzione di un'emulsione che, una volta liberata, ricade in forma di schiuma bianca, esplicando una buona azione coprente.

Fig. 153 – Sezione di un estintore a schiuma meccanica (Marchetti).

1) tappo centrale; 2) bombola contenente anidride carbonica compressa; 3) maniglia a vite per l'apertura della bombola; 4) dispositivo di sicurezza; 5) dischetto di piombo che si rompe sotto l'azione del getto; 6) lancia con turbina; 7) filtro; 8) contenitore per acqua e liquido schiumogeno.

Estintori a polvere

Consistono in un recipiente adatto a sopportare alte pressioni, pieno di una polvere leggermente granulare, in genere di carbonato di calcio, alla cui espulsione provvede, come negli estintori idrici o una bombola di gas compresso, o una pressione d'aria immessa nel recipiente al momento della carica.

Il getto viene diretto sull'incendio in modo che la polvere possa esplicare un'azione coprente.

Questi estintori, per il limitato volume di polvere che possono emettere, sono adatti per piccoli incendi, come potrebbero essere quelli che si sviluppano nelle parti esterne dei motori a scoppio.

Estintori a polvere Kidde Dry

Si tratta di un tipo completamente diverso da quello descritto benchè il metodo di espulsione sia lo stesso.

La composizione della polvere, costituisce la caratteristica peculiare di questi estintori, infatti gli effetti che se ne ottengono sono del tutto particolari.

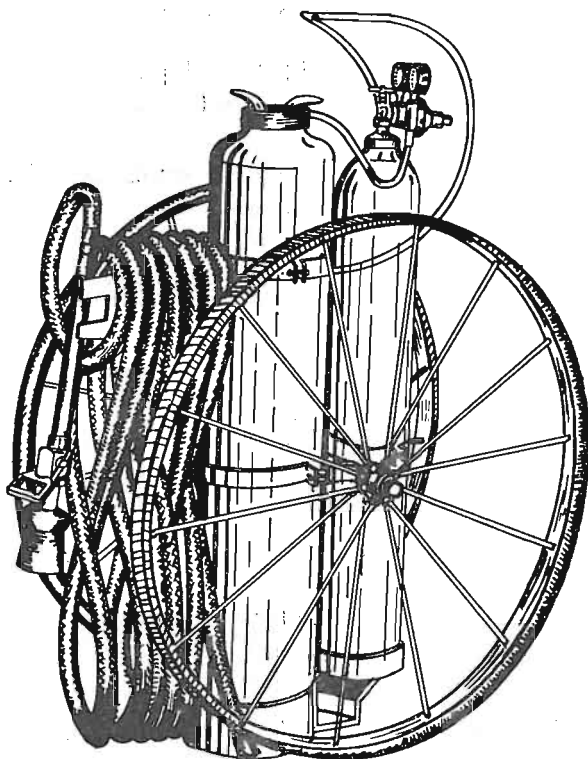



Fig. 154 – Estintore a polvere Kidde Dry.

Una parte del materiale emesso, a 62 °C di temperatura, si trasforma in CO_2, il resto rimane integro e forma il materiale coprente, impedendo la riaccensione dell'incendio.

La polvere, più sottile della cipria, di un colore azzurrino, è assolutamente inattaccabile dall'umidità e l'estintore può essere usato su impianti elettrici in tensione.

Spruzzato sui liquidi, galleggia su di essi, formando una pellicola di copertura, i cui effetti sono più efficaci di quelli ottenuti con la schiuma, in quanto l'azione coprente non può essere eliminata dal calore.

La nube di polvere, che si forma davanti all'estintore, essendo costituita da materiale coibente, ha un efficace effetto protettivo sull'operatore (fig. 154).

Estintori al tetracloruro di carbonio

Il tetracloruro di carbonio (CCl_4) è un liquido ininfiammabile che evapora a bassa temperatura e che fino ad un certo limite può essere considerato isolante.

Esso è contenuto in un recipiente e viene espulso con gli stessi metodi usati per gli estintori idrici a pressione.

Questi tipi di estintore vengono usati in luoghi dove presumibilmente l'incendio sia provocato da conduttori elettrici in tensione o da liquidi infiammabili.

Il grado di isolamento può variare con la purezza del liquido contenuto nell'estintore, in generale se ne sconsiglia l'uso quando il valore della tensione negli impianti supera i 3000 volt.

Particolare attenzione va posta nell'usare questo tipo di estintore, in quanto il tetracloruro di carbonio, sia puro, sia contenente tracce di cloroformio, al contatto con la fiamma si ossida dando luogo a formazione di gas di fosgene ($COCl_2$) con evidente pericolo per chi usi questi apparecchi in luoghi chiusi non ventilati.

In vari tipi di estintori similari, al posto del tetracloruro di carbonio si usa il bromoclorometano (CH_2ClBr) o il freon ($CBrF_3$).

Estintori ad anidride carbonica

Sono costituiti da recipienti atti a sopportare alte pressioni, nei quali viene immesso un certo quantitativo di anidride carbonica (CO_2), quantitativo che varia da 700 grammi, nei tipi piccoli (fig. 155), a 30 kg nelle bombole carrellate (fig. 156).

L'azione dell'anidride carbonica, il cui getto va diretto alla base dell'incendio, è di varia natura. Infatti, per il rapido passaggio dallo stato liquido allo stato gassoso essa assume una temperatura di circa 70 °C sotto zero, determinando, davanti a chi usa l'estintore, una zona fredda che ne permette l'uso a poca distanza dal focolaio d'incendio.

Inoltre per l'energica azione del soffio, agisce sui liquidi infiammati, riducendo il raggio di azione della fiamma, ed essendo più pesante dell'aria si sostituisce ad essa interrompendo la combustione.

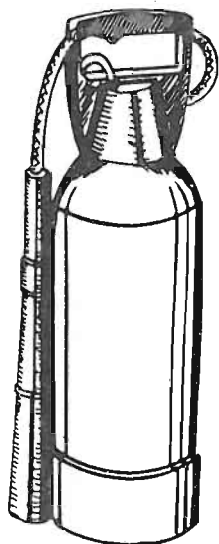



Fig. 155 – Estintore ad anidride carbonica tipo Kidde manovrabile a mano.

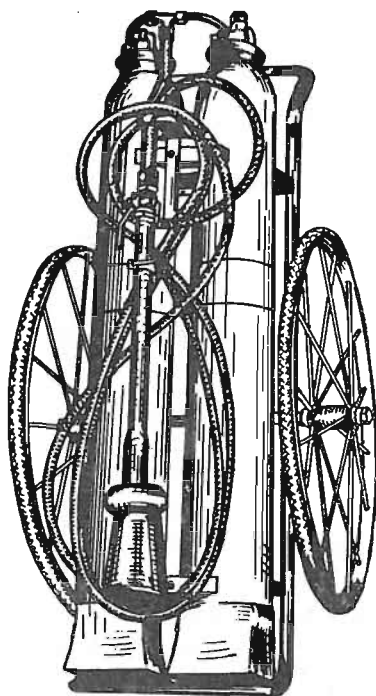



Fig. 156.
Estintore ad anidride carbonica tipo Kidde carrellato.

L'anidride carbonica è isolante e può essere impunemente usata in locali dove esistano conduttori percorsi da energia elettrica, a qualunque tensione essa sia; lascia completamente inalterati gli oggetti in essa immersi, ed è particolarmente indicata nello spegnimento di incendi di liquidi infiammabili.

La sua azione, che può essere provocata anche automaticamente, è consigliabile in modo speciale in locali adattati a cabina di trasformazione, nei quali insieme al pericolo dell'incendio degli oli isolanti è sempre presente il pericolo di contatti con parti in tensione.

Riassumendo quanto abbiamo esposto, diremo che gli estintori idrici sono adatti per incendi di materiale combustibile solido, quelli al tetracloruro di carbonio possono essere usati in locali dove ci sia pericolo di contatto con apparecchiature in tensione, limitatamente a poche migliaia di volt; gli estintori a polvere si adoperano per incendi inerenti i motori a scoppio, sempre quando la superficie interessata sia di modeste dimensioni; gli estintori a schiuma sono adatti a spegnere combustibili liquidi e, stante la quantità di schiuma che possono produrre, hanno un'azione efficace anche su incendi a grande area; gli estintori ad anidride carbonica e quelli a polvere Kidde Dry possono essere usati per gli stessi scopi in particolar modo nei locali adibiti a cabine di trasformazione dove l'uso di estintori a schiuma è assolutamente inibito.

Manutenzione degli estintori

La manutenzione degli estintori, a qualunque specie essi appartengono, rappresenta la condizione base per assicurare la continuità del loro funzionamento. Trascurare questa importantissima operazione vuol dire, nella maggior parte dei casi, rendere inutile la spesa di acquisto dell'estintore, che, al momento dell'uso, non potrà certamente esplicare la sua azione.

Negli estintori idrici a carica di acido solforico, sarà sufficiente una volta all'anno rilevare che la fialetta contenente l'acido sia in perfetto stato e ogni tre anni occorrerà cambiare la soluzione di bicarbonato di sodio.

Negli estintori idrici a carica di anidride carbonica, una volta all'anno si dovrà pesare la bomboletta contenente il gas, cambiandola ogni volta che venga rilevata una diminuzione di peso.

Negli estintori a schiuma chimica dovremo cambiare ogni cinque anni le soluzioni contenute nei due vasi, osservando attentamente che il rivestimento interno in piombo dei recipienti sia intatto.

Negli estintori a schiuma meccanica, a polvere e a tetracloruro, pesare una volta all'anno la bombola di gas seguendo le stesse modalità già date per gli estintori idrici.

Negli estintori idrici o a polvere nei quali la pressione è insita nel recipiente al momento della carica, basterà ogni tanto dare un'occhiata al manometro posto sul manico per rendersi esatto conto dello stato di funzionamento dell'estintore.

Negli estintori ad anidride carbonica, occorre verificare il peso delle bombole ogni sei mesi, facendole ricaricare ogni qual volta la diminuzione di peso superi il 10% del contenuto netto.

Criteri di posa

Gli estintori vanno posti, se di piccola mole, appesi alle pareti, in luoghi bene in vista; sulla parete dovrà essere dipinto un rettangolo rosso, le cui dimensioni siano superiori a quelle d'ingombro dell'estintore.

Sul fianco dell'estintore, nell'area dipinta, andrà appeso un cartello nel quale devono essere chiaramente indicate le istruzioni per l'uso.

È buona norma, per gli estintori idrici e a schiuma, rendere molto evidente l'avvertenza di non fare uso dell'apparecchio su impianti elettrici funzionanti.

La mancanza di tale avvertenza potrebbe essere causa di gravissimi infortuni.

Da quanto abbiamo detto appare evidente come sia necessario, al personale che in caso di necessità debba usare gli estintori, una buona conoscenza degli elementi costitutivi dell'apparecchio e come sia necessario saper scegliere tra i vari tipi, l'estintore adatto per l'incendio che si prevede possa svilupparsi nel locale dove viene posto.

CAPITOLO III

IMPIANTI AUTOMATICI ANTINCENDIO

L'onere conseguente un incendio dipende, in linea diretta dalla gravità che questo assume, la quale, a parità di beni distruggibili, è tanto maggiore, quanto maggiore è il tempo che trascorre fra il determinarsi dell'incendio e l'intervento atto all'estinzione del fuoco.

Questa considerazione, d'importanza basilare, ha dato luogo allo studio e alla costruzione di impianti antincendio a intervento automatico, specialmente usati quando occorre proteggere locali, macchine o depositi contenenti liquidi infiammabili, nei quali la rapidità di espansione dell'incendio è oltremodo notevole.

Restringendo il campo di studio alle cabine e alle stazioni di trasformazione, considereremo due tipi d'impianto che vengono normalmente usati:

— impianti automatici ad anidride carbonica;
— impianti automatici ad acqua nebulizzata.

Gli impianti automatici a polvere, del resto molto simili a quelli ad anidride carbonica, difficilmente si usano nelle cabine per le ragioni già esposte a pag. 324

Impianti automatici antincendio ad anidride carbonica

Vengono usati di preferenza quando l'impianto elettrico è contenuto in locali chiusi, benchè nulla osti alla loro adozione anche negli impianti all'aperto.

Essi si compongono di quattro parti essenziali:

— recipienti di contenimento del mezzo estinguente, comprendenti i dispositivi di apertura;
— i mezzi di trasporto del fluido dai recipienti all'utilizzazione;
— gli elementi sensibili all'incendio che determinano l'intervento;
— i sistemi di comando.

Recipienti di contenimento.

Sono costituiti da bombole in lamiera d'acciaio a forte spessore e possono contenere un massimo di 35 kg di anidride carbonica fortemente compressa.

Il numero delle bombole, e quindi la quantità di anidride necessaria per un sicuro intervento, dipende dal tipo e dalle dimensioni del locale che s'intende proteggere.

Grosso modo occorre rilevare che le quantità di anidride carbonica necessaria per spegnere un incendio in un locale chiuso, deve essere calcolata in base al volume del locale, tenendo presente che per lo spegnimento di un incendio di liquidi infiammabili, la concentrazione di anidride carbonica varia dal 34 al 50%.

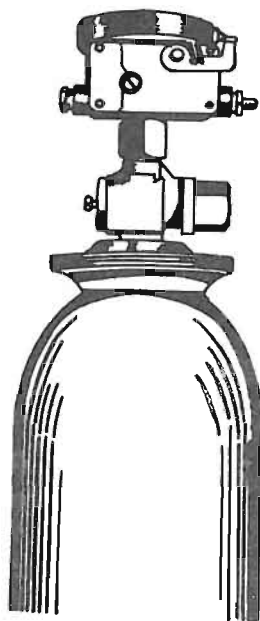
Per incendi su impianti all'aperto occorre prevedere un quantitativo di gas otto volte superiore.

La velocità di scarica del gas deve essere tale da ottenere una concentrazione del 30% nei primi due minuti.

Il numero delle bombole che occorre prevedere varia con la cubatura del locale; in genere il numero minimo è di due bombole.

I dispositivi di apertura dei contenitori del gas sono di due specie:

— valvole pilota;
— valvole di sgancio a pressione.

Fig. 157 – Forma esterna di una valvola pilota applicata ad una bombola di anidride carbonica.

Le valvole pilota sono poste generalmente su due bombole, e sono atte a ricevere e ad agire per l'impulso proveniente dagli elementi sensibili all'incendio, installati nel locale da proteggere.

Gli impulsi possono essere elettrici, quando si disponga di una fonte di energia non dipendente da quella agente nel locale da proteggere; in genere batterie di accumulatori stazionari, o piccole batterie tipo « voltabloc » continuamente mantenute in efficienza mediante una carica in tampone.

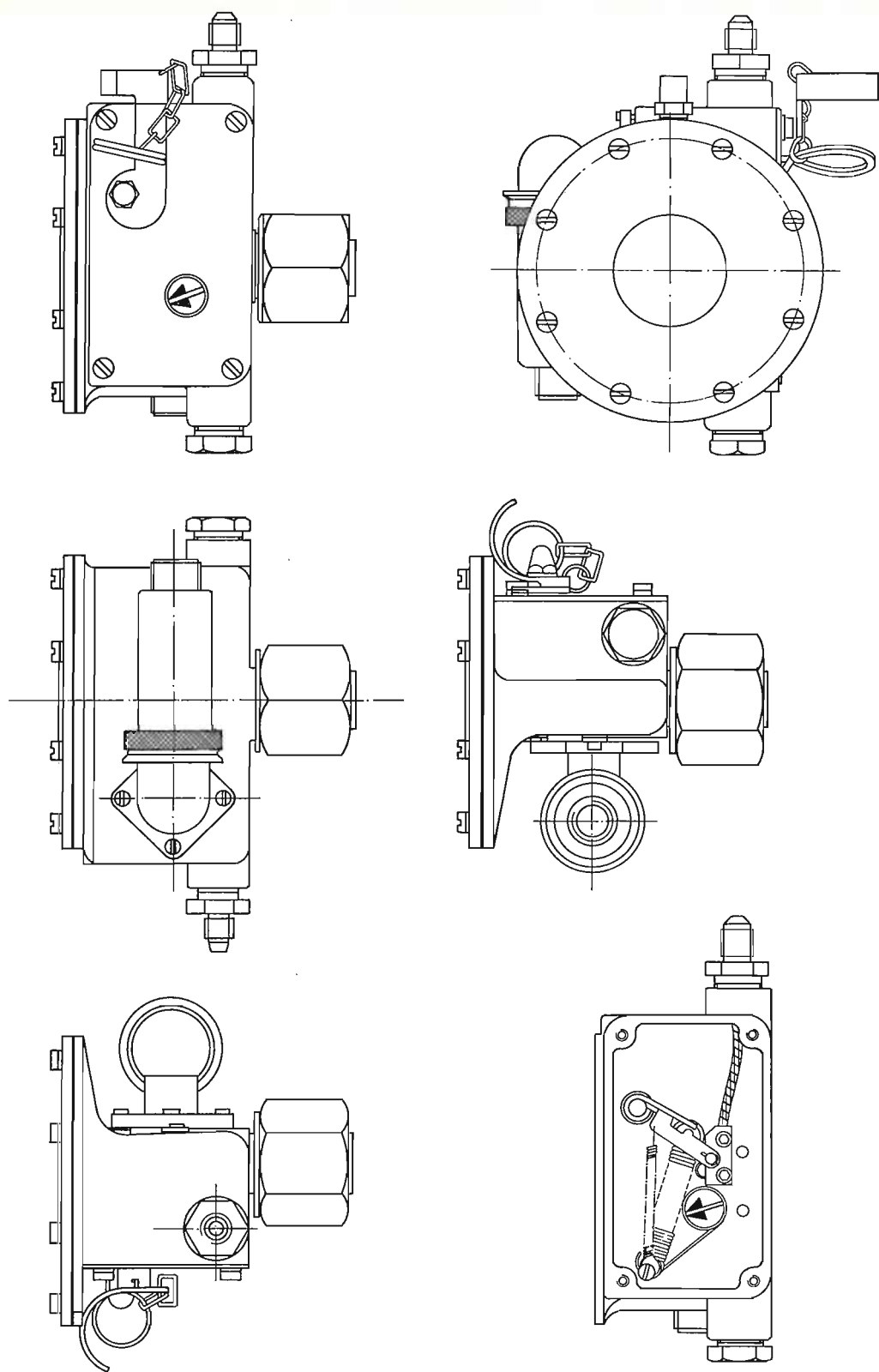



Fig. 158 – Particolari costruttivi di una valvola pilota a comando elettrico.

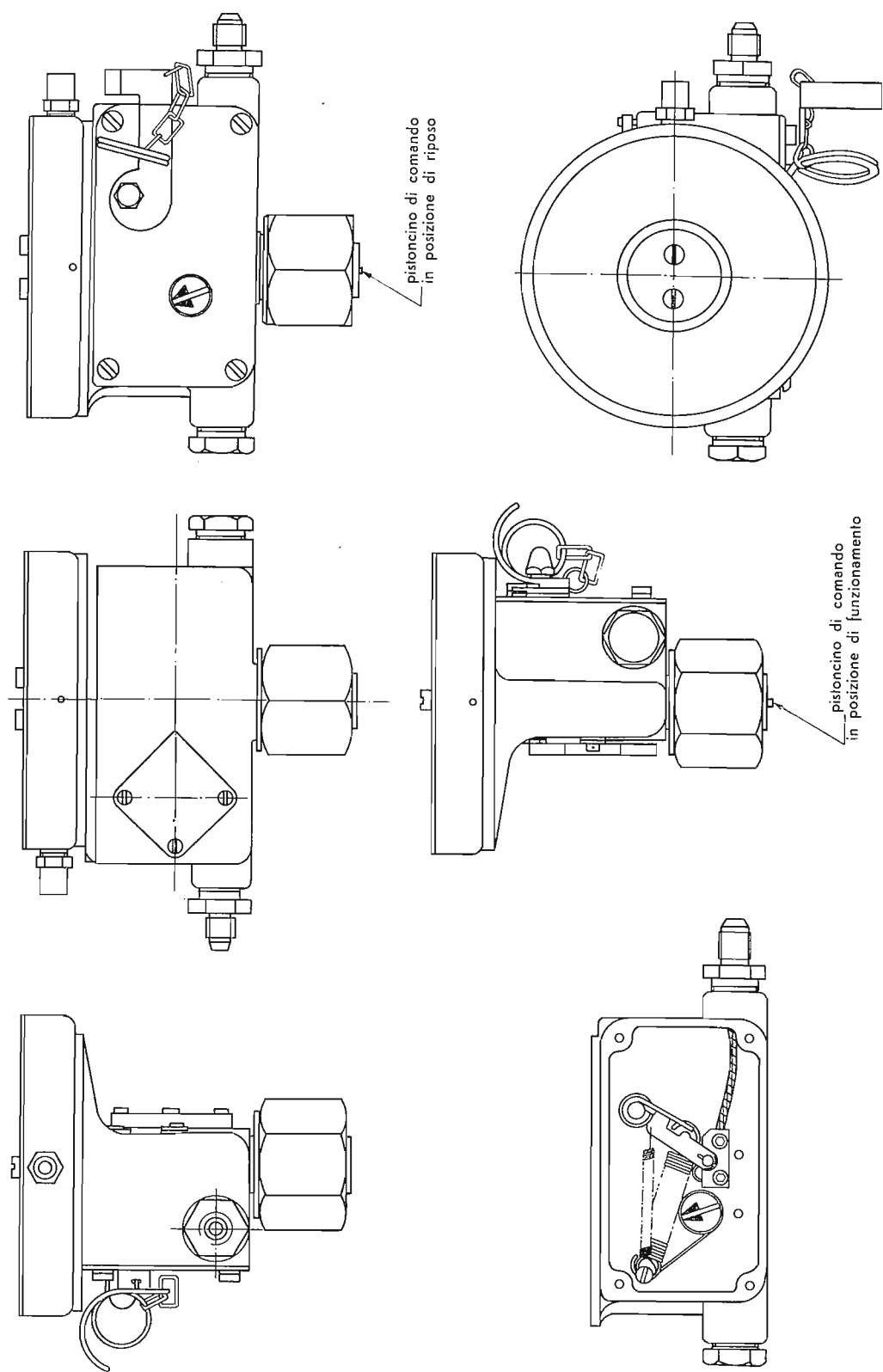



Fig. 159 – Particolari costruttivi di una valvola pilota a comando pneumatico.

In questo caso la valvola pilota assume la forma esposta nella figura 157, i particolari costruttivi sono riportati nella fig. 158.

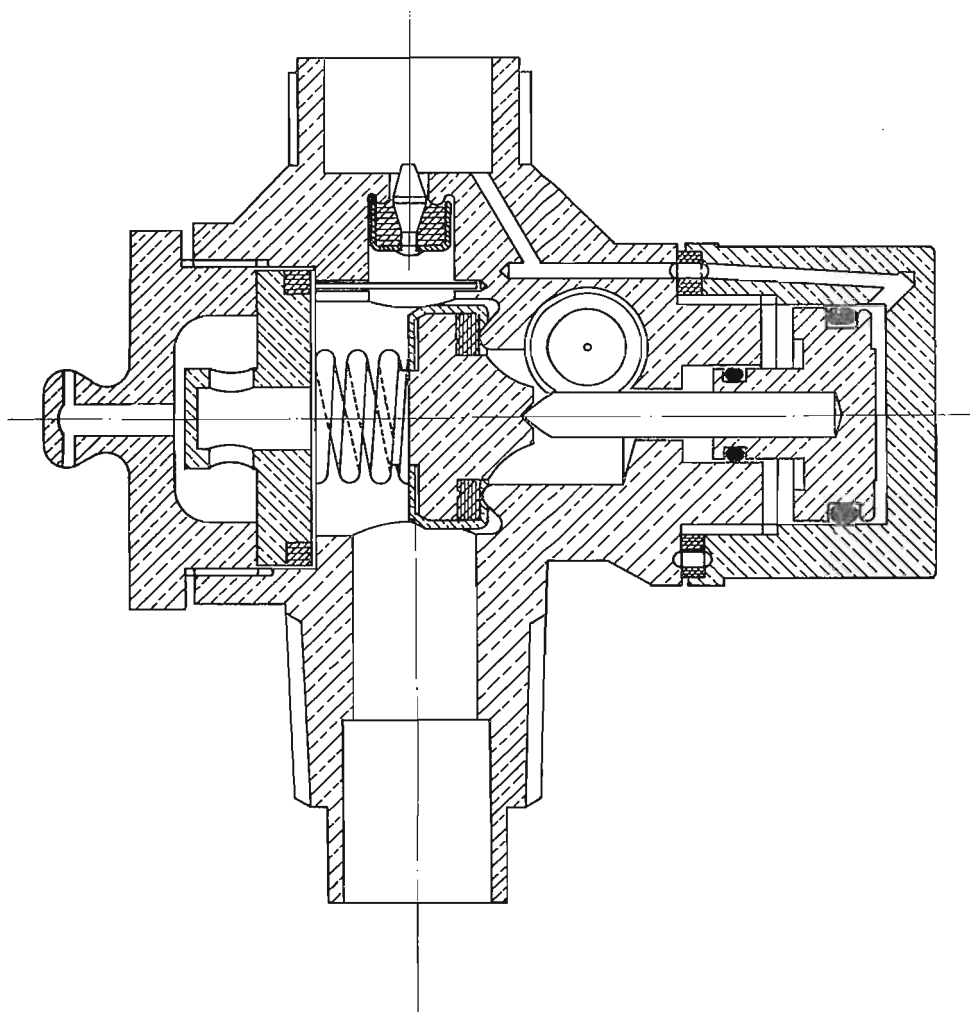



Fig. 160 – Valvola a flusso rapido con comando a pressione.

Quando non è possibile avere a disposizione energia elettrica si ricorre a impulsi di pressione; la forma della valvola è pressochè identica e i particolari costruttivi sono riportati nella fig. 159.

In entrambi i casi sulla valvola pilota è previsto il comando manuale.

Sulle bombole che non hanno la valvola pilota, l'apertura del contenitore si ottiene per mezzo della pressione che si determina nel tubo di trasporto del gas, dopo l'apertura delle bombole pilota (fig. 160).

Quando si intende proteggere diversi locali, nettamente separati, alla partenza delle varie tubazioni devono essere poste valvole d'intercettazione (fig. 161) costruite in modo da permettere al gas di propagarsi solo nella tubazione corrispondente al locale in pericolo.

Con questo sistema il quantitativo dell'anidride carbonica da prevedere deve essere sufficiente all'azione estinguente necessaria nel locale di maggiore cubatura.

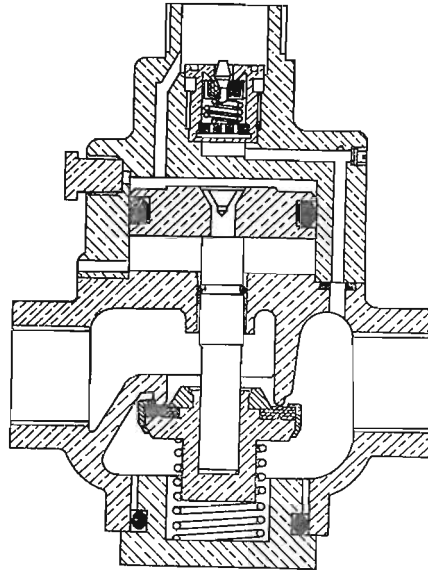



Fig. 161 – Valvola d'intercettazione.

Mezzi di trasporto del gas fluido.

Sono costituiti da tubazioni di acciaio resistenti alla pressione, il cui diametro deve essere attentamente calcolato poichè, se fosse fortemente ridotto, diminuirebbe sensibilmente la velocità di scarica, mentre se fosse troppo ampio permetterebbe all'anidride la possibilità di espandersi, con la conseguente formazione di ghiaccio asciutto sufficiente ad otturare la tubazione.

Nel calcolo del diametro dei condotti di trasporto occorre tenere presenti i seguenti parametri:

— quantità del gas da scaricare;
— velocità di scarica necessaria;
— perdite di carico delle tubazioni.

Onde evitare gli oneri dovuti alle perdite eccessive di carico è consigliabile che le bombole non distino più di 20 metri dai coni di erogazione.

Ogni diramazione dal condotto principale termina con un cono di erogazione (fig. 162) che viene posto nella posizione più conveniente, in previsione del probabile sviluppo dell'incendio.

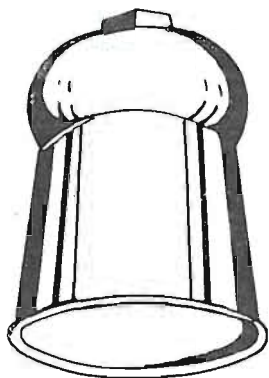



Fig. 162 – Cono di erogazione.

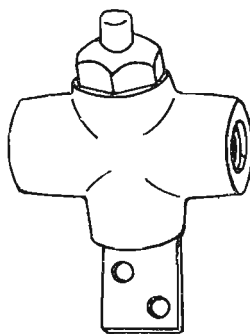



Fig. 163 – Sgancio a pressione.

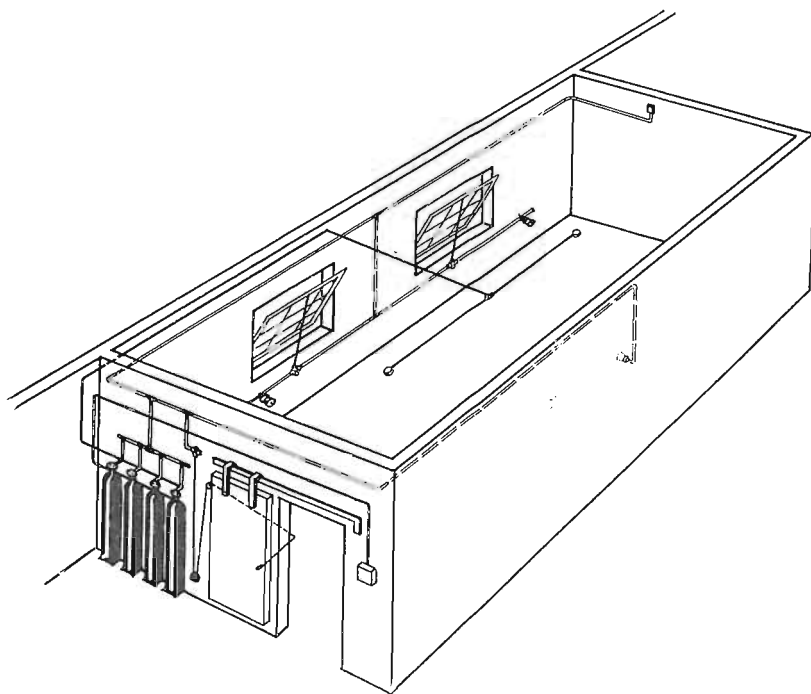



Fig. 164 – Vista d'insieme di un impianto automatico ad anidride carbonica.

L'ugello del cono deve essere esattamente calcolato in base alla pressione del gas e alla quantità di questo da erogare nel tempo voluto.

L'anidride carbonica deve uscire dal cono sotto forma di una densa nuvola, senza formazioni di neve o ghiaccio asciutto.

Nelle tubazioni devono essere inseriti gli sganci a pressione (fig. 163), atti a liberare le serrande necessarie a chiudere le eventuali aperture di ventilazione esistenti nel locale, o le porte normalmente previste aperte (fig. 164).

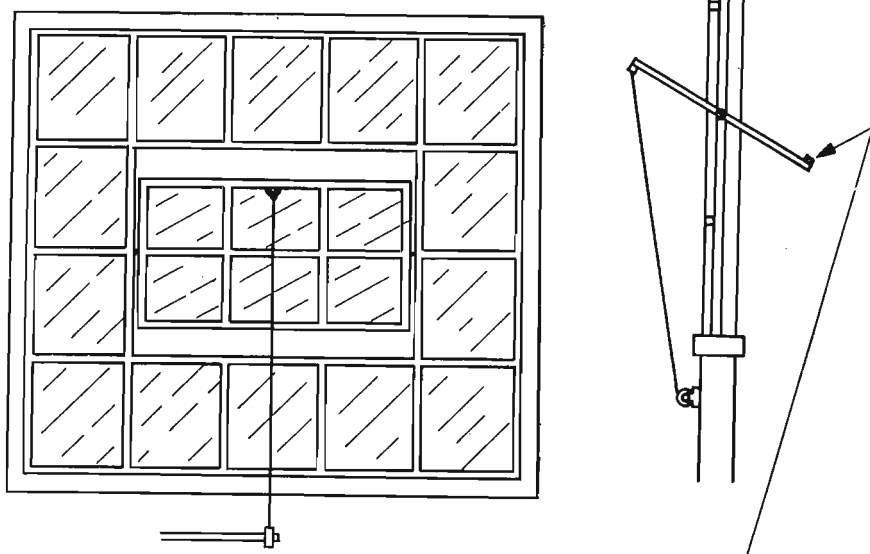



Fig. 165 – Metodo di chiusura di una finestra a cerniera.

La chiusura può essere prevista sia mediante lamiere a ghigliottina, che lamiere ruotanti su cerniere, spinte da una molla o da un contrappeso (fig. 165).

In qualche caso gli sganci possono agire su apparati elettrici a motore che comandano la chiusura automatica delle ventole.

Le tubazioni metalliche devono essere connesse in vari punti con l'impianto di terra.

Elementi sensibili.

Gli elementi sensibili all'incendio, previsti per l'invio dell'impulso necessario all'intervento automatico, devono essere installati nei punti in corrispondenza dei quali si prevede un rapido aumento della temperatura al determinarsi dell'incendio.

Il funzionamento deve avvenire quando il limite di temperatura, predisposto, mediante una taratura preventiva, viene oltrepassato; in genere si adotta un limite di $70 \div 80$ °C.

Gli elementi sensibili possono essere costituiti da termostati elettrici (fig. 166) quando per l'impulso di comando è possibile servirsi di energia elettrica, o da recipienti agenti per aumento di pressione (fig. 167) quando l'energia elettrica non è disponibile.

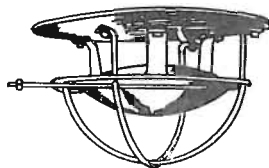
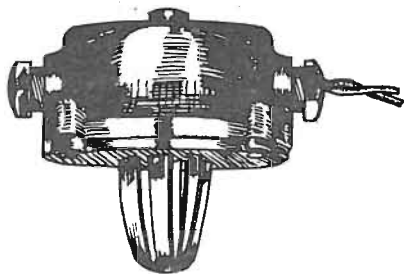



Fig. 166 – Tipo di termostato elettrico.

Fig. 167.
Tipo di termostato pneumatico.

Nel caso di comando elettrico, nell'impianto si prevede un quadro di comando e di segnalazione il cui schema di principio è riportato nella fig. 168.

In genere, contemporaneamente all'intervento del mezzo estinguente, mediante un impulso elettrico, si provoca l'azionamento della bobina di apertura dell'interruttore a media tensione posto sull'alimentazione del trasformatore, in modo da determinare il distacco della macchina, quando questo non fosse già avvenuto per sollecitazione dei relè di protezione da corto circuito.

Impianti automatici antincendio ad acqua nebulizzata

Gli impianti automatici ad acqua nebulizzata si usano specialmente nelle stazioni di trasformazione all'aperto, per le quali il quantitativo necessario di anidride carbonica assumerebbe proporzioni molto onerose.

Hanno soprattutto il pregio di usare un mezzo estinguente che ha un costo pressochè nullo, e non richiedono, come gli impianti ad anidride, il continuo controllo dell'efficienza delle bombole.

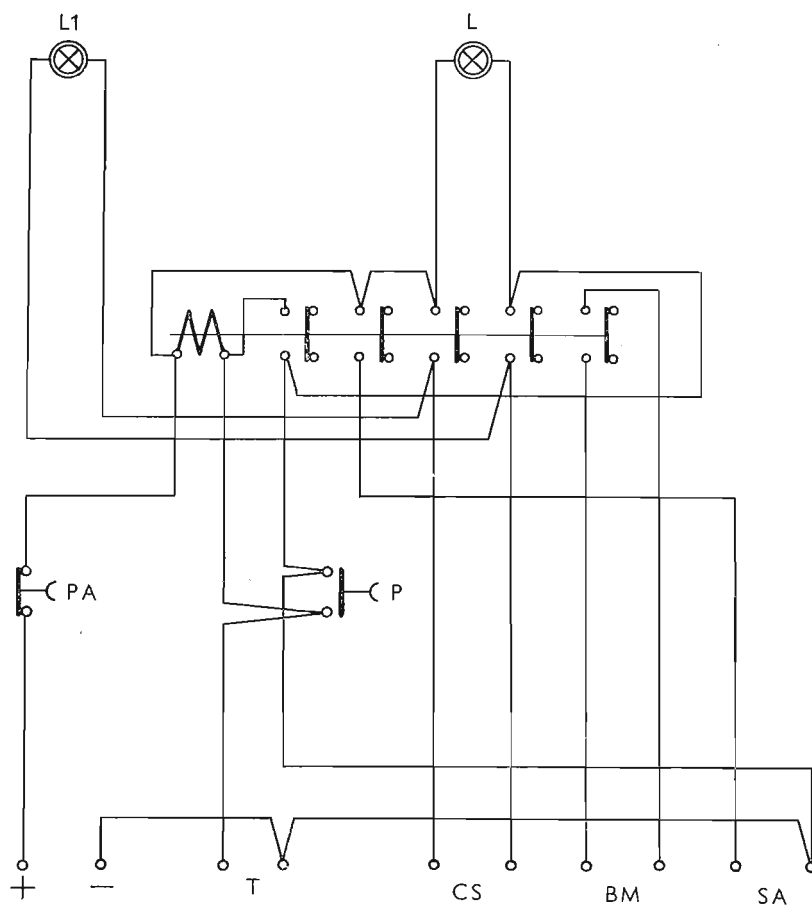



Fig. 166 – Schema di principio del quadro di segnalazione a comando.

La pressione dell'acqua necessaria per il funzionamento può avere valori minimi (da 0,5 atmosfere in più) facilmente ottenibili, quando non si abbia a disposizione un impianto di acqua potabile, con serbatoi posti a pochi metri di dislivello dagli erogatori.

L'impianto si divide in quattro parti principali:

— valvola a funzionamento rapido per l'immissione del liquido;
— condotti di trasporto del fluido estinguente;
— elementi sensibili all'incendio che provocano l'intervento:
— i nebulizzatori.

Valvola a funzionamento rapido.

Si tratta di una comune valvola a saracinesca atta alla manovra su condutture d'acqua in pressione.

L'apertura può essere determinata, come negli impianti ad anidride carbonica, sia mediante l'azione di energia elettrica, sia a pressione.

Impianto di trasporto del fluido.

Si costruisce con i comuni tubi per acqua potabile, dimensionati in modo da non provocare eccessive perdite di carico.

L'unico accorgimento necessario consiste in un rubinetto di svuotamento, da installare nella parte inferiore dell'impianto, da azionare quando, ad intervento ultimato, la situazione si è normalizzata, onde impedire che permanendo l'acqua nelle tubazioni, quando queste siano poste all'aperto, possa aversi formazione di ghiaccio all'interno durante la stagione fredda.

Non è necessario il collegamento con l'impianto di terra, quando la tubazione è metallicamente collegata con l'impianto esterno di acqua potabile.

Elementi sensibili.

Ripetono quanto è stato già detto per gli impianti ad anidride carbonica.

Nebulizzatori.

Costituiscono l'elemento più importante dell'impianto, in quanto dalla oculata scelta di questi apparecchi dipende la perfetta riuscita del complesso.

I nebulizzatori possono assumere forme variate, ma sono composti sempre da molti ugelli ognuno dei quali esplica l'azione nebulizzante su una parte dell'acqua erogata.

A seconda della posizione degli ugelli e della forma del nebulizzatore il getto erogato può essere a cono pieno, a cono piatto, a striscia sottile e a cono vuoto, adattandosi così a tutte le necessità determinate dalla forma e dalla posizione degli oggetti da proteggere.

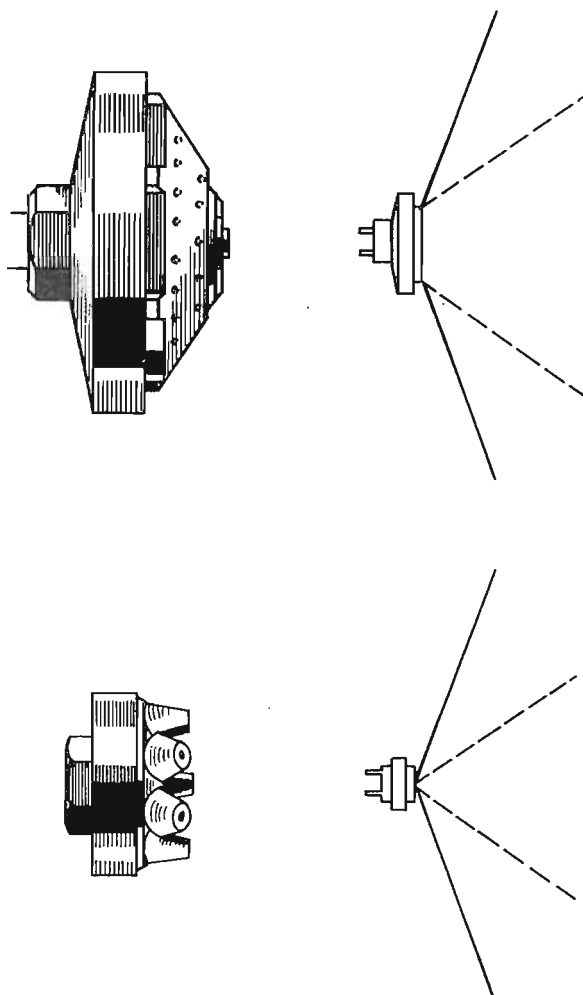



Fig. 169 – Nebulizzatori mod. KB; forma del getto, cono pieno; conicità 140°.

Nelle tre tabelle che seguono, in relazione ai nebulizzatori prodotti dalla Kidde, sono riportati, in funzione della pressione del liquido, i litri di acqua erogabili in un minuto.

TABELLA N. 87 – **Caratteristiche dei nebulizzatori a spazzola.**

Tipo KBF	161a	162a	163a	164a	162	163	301	302	303	303y	304
Pressione	portata in l/min.										
atmosfere 0,5	—	10,5	16	20	19	28	—	20	30	50	38
» 1	4,4	15	23	29	26	39	8,1	28	42	70	53
» 2	6,1	21	32	40	37	55	11,5	39	60	100	75
» 5	9,7	33	51	64	58	87	18	62	95	160	119
» 10	13,6	47	71	90	82	123	26	88	132	225	168
» 20	19	66	100	128	117	178	36	123	190	315	238

TABELLA N. 88 – **Caratteristiche dei nebulizzatori a cono pieno.**

Tipo	portata in l/min.		
	2 atm.	4 atm.	8 atm.
K B 2222	30	42	60
K B 2224	57	80	115
K Bs 2224 y	100	140	195
K B 2362	50	70	100
K B 2364	90	130	185
K B 2364 y	140	200	280
K B 2364 xy	255	360	510
K B 174	17	25	35
K B 276	40	56	80
K B 278	55	78	110
K B 278 x	160	225	320
K BZ 278 x	220	310	435

TABELLA N. 89 – **Caratteristiche dei nebulizzatori a cono vuoto e a ventaglio.**

Tipo	1 atm.	2 atm.	3 atm.
K EZ 25	7,4	10,5	13
K EZ 27	12	17	21
K F 34	8,3	12	15
K F 36	24	34	42

Nelle figure 169-170-171-172 sono riportate le forme esterne che i nebulizzatori possono assumere.

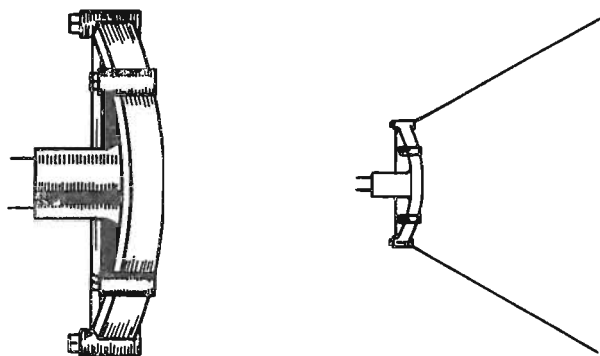



Fig. 170 – Nebulizzatore mod. KBF; forma del getto: cono piatto; conicità 60°.

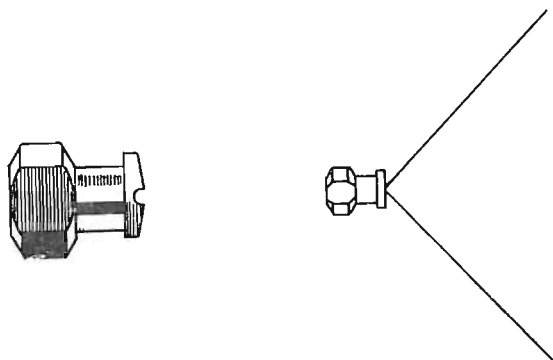



Fig. 171 – Nebulizzatore mod. KF; forma del getto; striscia sottile conicità 60-90-120°.

Fig. 172 – Nebulizzatore mod. K EZ; forma del getto: cono vuoto conicità 135°.

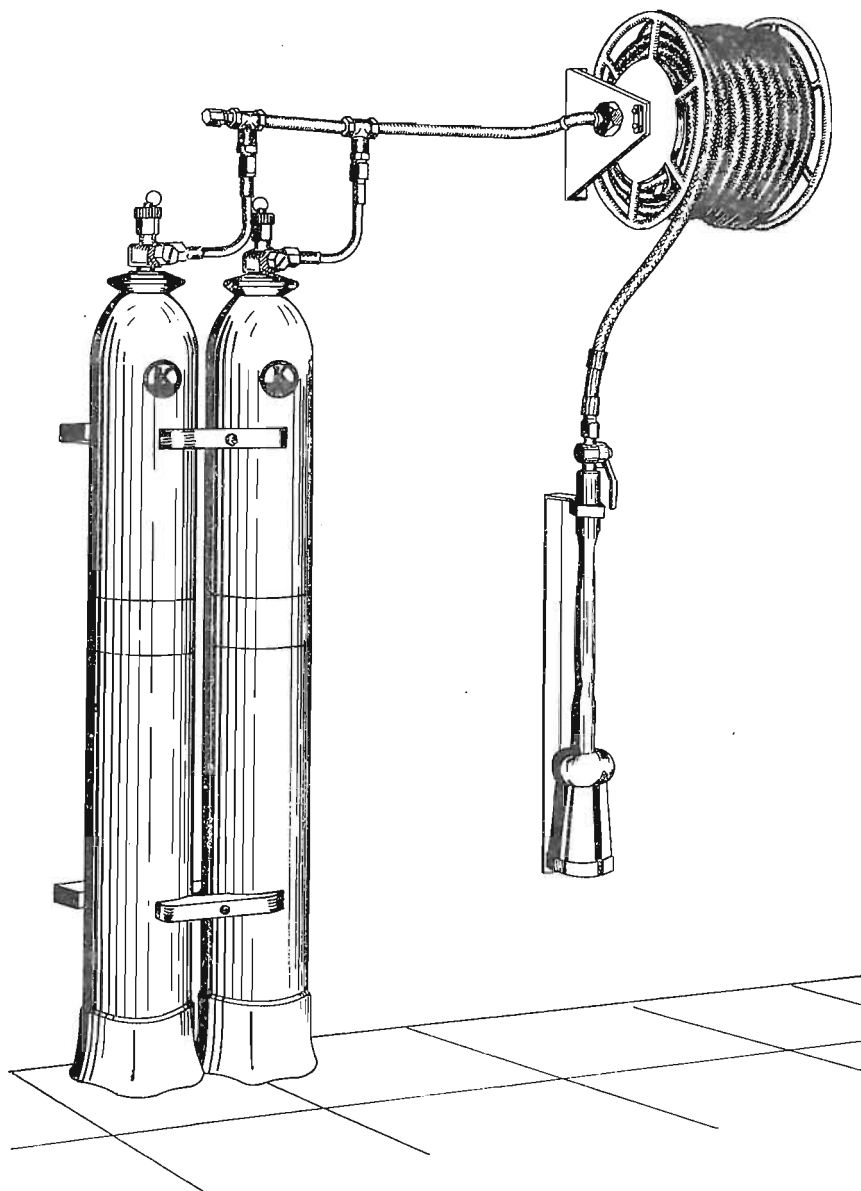



Fig. 173 – Stazione a manichetta (anidride carbonica).

Criteri di scelta dell'impianto antincendio.

La consistenza dell'impianto antincendio, qualora non esistano particolari ragioni che consiglino l'adozione dei mezzi più onerosi, dipende in linea diretta dal valore della potenza installata nella cabina di trasformazione.

Sarebbe infatti sproporzionato prevedere un impianto a intervento automatico quando nella cabina sia installato un trasformatore di potenza modesta, pensiamo perciò di far cosa grata ai lettori indicando, rapidamente, le soluzioni del problema generalmente adottate.

Trasformatori da 25÷50 kVA:

— estintore ad anidride carbonica o ad acqua nebulizzata fissato su parete e manovrabile a mano (circa 6 kg).

Trasformatori da 100 a 315 kVA:

— estintore ad anidride carbonica montato su carrello, o stazione a manichetta (fig. 173) (circa 60 kg).

Trasformatori da 400 a 1000 kVA in ambiente chiuso:

— impianto automatico ad anidride carbonica.

Trasformatori da 2000 a 10 000 kVA in ambiente aperto:

— impianto automatico ad acqua nebulizzata.

CAPITOLO IV

I TRASFORMATORI ISOLATI CON LIQUIDI SINTETICI ININFIAMMABILI

Tutti gli accorgimenti antincendio fin qui descritti supponevano che i trasformatori fossero del tipo isolato con olio minerale; evidentemente le necessità esposte decadono nel caso in cui i trasformatori vengano previsti immersi e isolati con liquidi sintetici ininfiammabili.

Da vari anni infatti si usa questo tipo di isolante per costruzioni particolari destinate, soprattutto, agli impianti da installare in luoghi di lavoro definiti pericolosi dalle vigenti leggi, in quanto in essi è possibile la formazione di miscele di vapori altamente infiammabili o esplodenti.

La mancata diffusione nei normali impianti di questi tipi di macchine, è dovuta ad elementi negativi che il lettore potrà rilevare nella breve descrizione che faremo sulle proprietà e le caratteristiche dei liquidi isolanti sintetici.

PARTICOLARITÀ DEGLI OLI SINTETICI

Tra i vari composti che la chimica ha messo a disposizione dei costruttori, l'orientamento generale si è polarizzato sui composti difenilici clorurati, ottenuti dal gruppo difenile $C_{13}H_{10}$, sostituendo ad alcuni atomi di idrogeno un ugual numero di atomi di cloro.

Quando la sostituzione viene condotta su tre atomi si ottiene il difenile tricloruro ($C_{13}H_7Cl_3$) mentre, rispettivamente, per il tetracloruro e il pentacloruro la formula diviene $C_{13}H_6Cl_4$ e $C_{13}H_5Cl_5$.

I prodotti sintetici, detti impropriamente oli sintetici, sono conosciuti in commercio con nomi creati dai vari fabbricanti (Askarel, Aroclor, Clophen, Pyralen, ecc.) e si differenziano essenzialmente per la percentuale di cloro contenuta, dalla quale dipendono, in buona misura, le proprietà elettriche.

Proprietà chimiche

La proprietà fondamentale dei composti clorurati difenilici è costituita dalla ininfiammabilità, dovuta, essenzialmente, alla grande stabilità del legame cloro-idrogeno.

Nella tabella 90 riportiamo, a titolo informativo, le percentuali dei prodotti da decomposizione, ottenute in modo univoco, da un olio minerale per trasformatori e dal difenile pentacloruro (circa il 54% di cloro in peso) per mezzo di un arco elettrico.

TABELLA N. 90 – **Prodotti di decomposizione ottenuti da un olio minerale e da un isolante sintetico per mezzo di un arco elettrico** (espressi in percento).

Prodotti di decomposizione	Olio minerale	Pentaclor. difenile
Idrogeno	60	0
Monossido di carbonio	3	0,2
Biossido di carbonio	0	0,2
Idrocarboni non saturi	16	0
Idrocarboni saturi	10	0
Ossigeno	2	0
Azoto	9	0
Cloro	0	0
Acido cloridrico	0	99 ÷ 100

Occorre notare che i prodotti di decomposizione dell'olio minerale, costituiscono una miscela gassosa che può divenire esplosiva quando entra in contatto con l'aria, mentre i prodotti di decomposizione del pentacloruro sono completamente inerti e che inoltre, il liquido rimane esente dagli effetti dell'ossidazione, facilmente riscontrabili nell'olio minerale.

Temperatura di solidificazione

Una differenza sostanziale fra gli oli minerali e i liquidi sintetici, del tipo difenile clorurato, si osserva nella temperatura di solidificazione che, per i primi, ha valori tali da non destare alcuna preoccupazione, qualunque sia la temperatura ambiente, mentre per i secondi occorre un at-

tento esame del tipo da usare, poichè il valore della costante dielettrica di questi, diminuisce nettamente quando la temperatura arriva a quella di solidificazione.

A titolo informativo riportiamo la temperature di solidificazione di tre prodotti sintetici di comune uso.

— tricloruro difenile (circa 42% di peso in cloro) = — 18 °C;
— tretracloruro difenile (circa 48% di peso in cloro) = — 9 °C;
— pentacloruro difenile (circa 54% di peso in cloro) = + 10 °C.

In base a questi dati è intuibile come il criterio di scelta debba essere essenzialmente riferito alla temperatura minima raggiungibile dall'ambiente, specialmente nel caso di macchine per le quali si prevedano cicli alterni di lavoro e di riposo, o per quelle nettamente di riserva.

La conducibilità termica dei clorurati difenilici è inferiore a quella degli oli minerali, in quanto la sottrazione del calore avviene principalmente per convezione.

Abbiamo già visto che sotto l'azione dell'arco voltaico la scomposizione dei liquidi sintetici isolanti dà luogo alla formazione di acido cloridrico anidro, che non attacca i metalli fin quando non viene in contatto con acqua.

In genere, contrariamente a quanto è ritenuto da molti, durante la decomposizione non si rileva la separazione di cloro elementare e di fosgene, due gas altamente tossici, è però buona norma ventilare il locale adibito a cabina di trasformazione con criteri molto più severi di quelli normalmente adottati per i trasformatori isolati con oli minerali.

Potere solvente dei liquidi sintetici isolanti

Una proprietà negativa di questi composti è il potere solvente molto elevato nei riguardi delle sostanze organiche, con un'aggravante, da considerare attentamente, in quanto, le proprietà isolanti diminuiscono notevolmente quando il liquido viene inquinato da sostanze estranee disciolte in esso, anche in quantità modesta.

In base ad una buona esperienza in merito può essere considerato come di effetto non nocivo il seguente materiale:

— cartone presspann nella maggioranza dei tipi d'uso comune;
— materiali isolanti indeformabili preparati a base di resina alchidica, resina anilica e resina ureica;

— materiali isolanti per i conduttori degli avvolgimenti:
carta;
cartone;
triafol, che consiste in una foglia isolante a base di aceto-butirrato di cellulosa;
— materiali leganti:
— colle animali ed adesivi a base di cellulosa;
— come tubi isolanti: tessuti di vetro protetti da vernici non solvibili.

Usando il caucciù di siliconi, come materiale atto alla costruzione di guarnizioni, occorre ricordare che questo materiale ha poco influsso sulle qualità dielettriche degli isolanti sintetici, ma che questi liquidi propendono, in misura inversamente proporzionale alla loro viscosità, a diffondersi attraverso di esso.

Sono da ritenere pericolosi, per l'integrità delle caratteristiche elettriche dei liquidi isolanti sintetici, tutti i materiali a base di resine fenoliche, come la bachelite e le vernici bachelizzanti, e il legno che costituisce i gioghi, quando sia ricco di resine.

Si possono usare legnami poveri di resina come il pioppo, l'acero e il faggio bianco, dopo un lungo periodo di bollitura nel liquido sintetico scelto come isolante.

Un'altra avvertenza riguarda il materiale usato come solvente nelle eventuali saldature a stagno. Usare per questo scopo la colofonia può pregiudicare le caratteristiche dielettriche dei difenili clorurati.

È pertanto opportuno evitare l'impiego di solventi ausiliari di qualsiasi natura e fare uso per le saldature di conduttori preventivamente stagnati, accuratamente lavati nel tretracloruro di carbonio.

Tutte queste notizie, che escono del campo della trattazione, vengono fornite, onde aiutare chi dovesse procedere ad eventuali riparazioni di macchine isolate con liquidi sintetici isolanti.

Norme igieniche per la manipolazione dei difenili clorurati

Oltre a quanto detto, riteniamo molto importante aggiungere alcune indicazioni riguardanti il possibile influsso dei difenili clorurati sull'organismo umano, contenute nelle « Norme per la manipolazione del

Clophen » emanate dalla Wirtschaftsstelle Starkstrom-Kondensatoren e. V.

Sotto il nome generico brevettato di Clophen è stato messo in commercio un isolante di consistenza da oleosa a resinosa e composto di un idrocarburo clorurato. La manipolazione di questo prodotto può, in determinate condizioni, arrecare disturbi fisiologici al personale ad essa addetto, qualora venga assorbito dall'organismo sia tramite gli organi della respirazione che attraverso la pelle. Il Clophen può tuttavia essere manipolato senza pericolo di inconvenienti, a condizione che si adottino opportune misure sia di carattere tecnico che igienico.

1. Le misure di carattere tecnico devono essere intese, in primo luogo, ad ottenere una perfetta ventilazione dei locali nei quali si svolge la lavorazione, ed inoltre a disporre le fasi di lavorazione in maniera tale che i vapori non possano propagarsi nell'ambiente di lavoro.

I recipienti che contengono Clophen e che abbiano una superficie piuttosto estesa non vanno lasciati mai aperti (anche per evitare, tra l'altro, che il prezioso liquido isolante venga inquinato da polvere od umidità). Nel caso di lavori che richiedono l'esposizione degli occhi o del viso nell'immediata vicinanza del prodotto, sarà necessario disporre sul posto di un sistema di tiraggio particolarmente efficace. Il contatto del Clophen con la pelle, ad esempio con quella delle mani, deve essere evitato mediante l'uso di appositi dispositivi ed attrezzi.

Nel surriscaldamento del Clophen con la fiamma viva o con il saldatore si generano vapori contenenti acido cloridrico; per tale ragione bisogna evitare, per quanto possibile, di eseguire saldature sulle superfici dei recipienti contenenti Clophen. Nei casi in cui non si possa in alcun modo evitare la saldatura nell'immediata vicinanza del Clophen, si dovrà mantenere sia l'oggetto saldato che il saldatore ed anche il materiale di saldatura (che a caldo emettono ancora per qualche tempo vapori nocivi) sotto una cappa di tiraggio.

La pulizia delle parti degli apparecchi venute a contatto con Clophen può essere fatta mediante un solvente. Se si adopera il tricloroetilene sarà peraltro necessario attenersi strettamente alle apposite norme igieniche prescritte per l'impiego di tali idrocarburi di eccezionale volatilità (manipolazioni in recipienti chiusi e sotto efficaci tiraggi oppure previa protezione del personale mediante maschere ed apparecchi di respirazione). Un solvente molto meno pericoloso dal punto di vista igienico è lo xilolo, che però è infiammabile.

2. Dal punto di vista igienico è ovvia, da parte del personale, l'osservanza della più scrupolosa pulizia, sia per quanto riguarda gli indumenti che il posto di lavoro. Se il contatto occasionale del Clophen con la pelle non può essere del tutto evitato, sarà opportuno frizionare preventivamente la pelle con la pomata alla glicerina citata nella Farmacopea Germanica (DAB. 6), con la quale si ottiene una protezione molto efficace. Interrompendo il lavoro, anche per breve tempo, il viso, il collo e le braccia devono essere lavati accuratamente con acqua (meglio se calda) e sapone. È necessario disporre in numero sufficiente di lavandini con acqua calda e fredda. Piccole ferite devono essere medicate accuratamente prima dell'inizio del lavoro. Se piccole ferite venissero a contatto col Clophen (le ferite più grandi vanno naturalmente affidate alla cura del medico) verranno trattate nella maniera usuale e cioè bagnate con un tamponcino imbevuto di una soluzione disinfettante oppure ricoperte con una fasciatura sterile o antisettica.

Quando il Clophen venisse in contatto con gli occhi, *sciacquarli con abbondanti quantità di una soluzione tiepida di acido borico al 3%*. È opportuno l'impiego di tute di protezione. Indumenti e calzature imbevuti di Clophen vanno subito cambiati. Indumenti sporchi vanno opportunamente puliti. Un lavaggio degli indumenti con solventi (il cosiddetto lavaggio chimico) è raccomandabile solo in quei casi in cui il solvente sia stato liberato completamente, mediante distillazione ripetuta, dal Clophen che possa eventualmente contenere. Un efficace lavaggio degli indumenti di lavoro è ottenuto con l'impiego di Avolan O (1). Si sciolgono per ogni litro d'acqua 5 g di Avolan O o di Emulgator W con 3 grammi di soda anidra e si esegue il lavaggio in una macchina per lavare, facendo bollire per 20 minuti. Operai che hanno tendenza ad infiammazioni alla gola ed a catarro delle vie respiratorie superiori, come anche quelli che, per propria esperienza, sanno di possedere una pelle molto delicata o che soffrono di eruzioni cutanee, infezioni parassitarie o simili, non devono essere impiegati in lavori che abbiano a che fare col Clophen. È altrettanto da evitarsi che persone affette da malattie croniche (ad es. da sifilide) o da disturbi agli organi interni (cuore, fegato o reni) lavorino col Clophen. I direttori di stabilimento, i capi-officina e i capi-operai devono aver cura di far osservare le norme protettive nonchè le prescrizioni per la pulizia personale e delle officine.

(1) Fornito dalla Farbenfabriken Bayer.

Il lettore avrà potuto rendersi conto, attraverso questa breve descrizione, di quali e quanti elementi negativi si vada incontro quando s'intenda usare trasformatori isolati con liquidi sintetici clorurati, e perchè, nella maggioranza dei casi, si preferisca prevedere accorgimenti antincendio, anzichè ricorrere all'uso di questo tipo di macchine che potrebbe risolvere, in modo radicale, il problema della protezione dai pericoli derivanti dall'infiammabilità degli oli minerali per trasformatori.

INDICE ANALITICO ALFABETICO

D

E

F

G

I

L

M

N

O

P

R

S

T

U

V

TABELLA N. 6 – **Schemi da realizzare per la rivelazione dei guasti ottenuta con i metodi a fianco indicati.**

randezza registrata	TRASFORMATORE		
	Monofase	Trifase senza neutro	Trifase con neutro
Corrente di neutro	monofase; A, B, a, b; S; All'oscillografo	A, B, C, a, b, c; S; All'oscillografo	A, B, C, N, a, b, c; S; All'oscillografo
Corrente di cassa	A, B, a, b; S; All'oscillografo	A, B, C, a, b, c; S; All'oscillografo	A, B, C, N, a, b, c; S; All'oscillografo
ensione indotta al secondario	A, B, a, b; R; All'oscillografo	A, B, C, a, b, c; R; All'oscillografo	A, B, C, N, a, b, c, n; R; All'oscillografo
		scegliere tra i morsetti secondari quelli che corrispondono alla fase primaria in prova	
orrente capacitiva secondaria	A, B, a, b; S; All'oscillografo	A, B, C, a, b, c; S; All'oscillografo	A, B, C, N, a, b, c; S; All'oscillografo

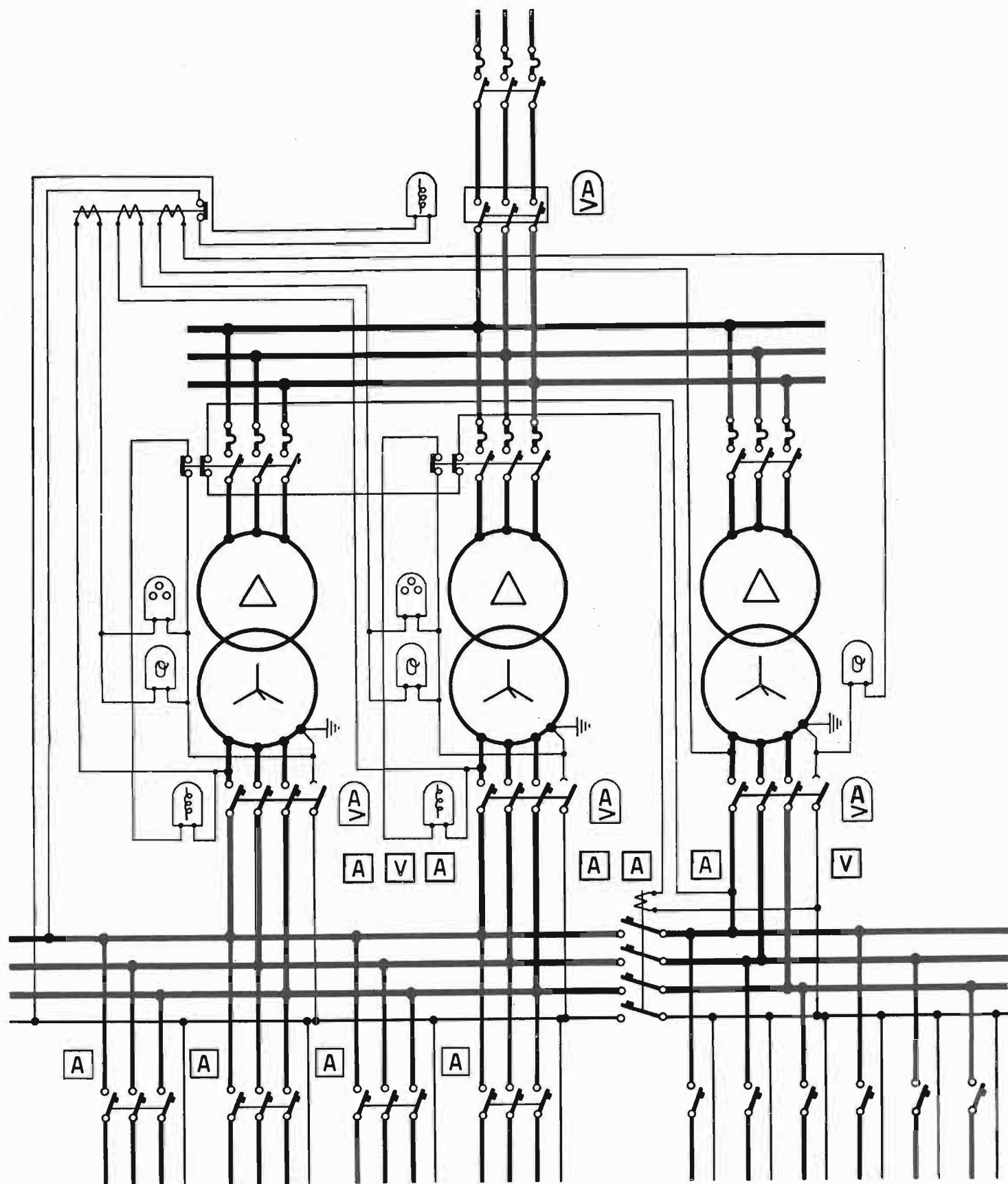



Fig. 108 – Schema dei collegamenti principali e ausiliari in una cabina di trasformazione.

MAINARDIS M., **Centrali elettriche.** 3ª edizione rifatta ed aumentata. 1957, in-8, di pag. XXIV-800, con 363 illustrazioni e numerose tabelle. In rilegatura tutta Linson, sopracopertina a colori plastificata . . . . **L. 5500**

— **I forni elettrici e le industrie elettrosiderurgiche, elettrometallurgiche, elettrochimiche, elettrotermiche, elettrolitiche.** 3ª ediz. 1954, in-8, di pag. XXXII-686, con 337 illustrazioni . . . . **L. 3500**

MARANTONIO E., **Elettronica industriale. Elementi ed applicazioni fondamentali.** Seconda edizione riveduta ed aumentata. 1964, in-8, di pag. XX-656, con 785 illustrazioni e 18 tavole fuori testo. Copertina a colori plastificata . . . . **L. 8000**

Tubi elettronici a vuoto - Amplificatori a tubi elettronici - I tubi a vuoto nei circuiti generatori di segnali - Calcolatori analogici - Applicazioni industriali dei tubi elettronici a vuoto - Tubi elettronici a gas - Circuiti raddrizzatori - Dispositivi a semiconduttori (transistori) e relative applicazioni - Circuiti logici - Controllo di motori - Controllo di saldatrici - Dispositivi fotoelettrici - Nozioni sui sistemi di regolazione - Servomeccanismi.

MARTINOLI B., **Isolatori di porcellana.** Generalità e caratteristiche degli isolatori. Isolatori per alta tensione. Collaudo degli isolatori. 1947, in-8, pag. XVI-200, 146 figure e 16 tabelle **L. 500**

MAZZILLI L., **Arcosaldatura.** Corso completo in 20 lezioni. Nozioni e lezioni pratiche ad uso dei tecnici e degli operai saldatori. 5ª edizione aggiornata e ampliata. 1963, in-16, di pagine XVI-220, con 128 figure e 8 tabelle. Copertina a colori plastificata . . . . **L. 1200**

Impianti di saldatura - Saldature autogene - Attrezzi del saldatore - La « Nufe » - Lezioni pratiche - Elettrodi - Saldatori - Esami per il brevetto del Registro Italiano Navale - Controllo delle saldature - Flusso magnetico - Deformazione dei giunti saldati - Tensioni interne - Sistemi speciali - Saldature ad arco sommerso manuale - Saldatura elettrica in atmosfera di gas - Saldatura a freddo della ghisa - Saldatura di metalli vari - Rimozione di viti spezzate - Taglio elettrico.

MAZZOCCHI M., **Avvolgimenti delle macchine elettriche a corrente continua e alternata.** Costruzione - Riparazione - Anormalità - Localizzazione dei guasti. 9ª ediz. aumentata ed aggiornata. 1957, in-8, pag. XX-800, 1212 figure originali delle quali 65 a colori, 51 tabelle **L. 3500**

Macchine a corrente continua - Macchine a corrente continua, sistema indotto - Collettori - Macchine a corrente continua speciali - Macchine a corrente alternata - Avvolgimenti statorici a corrente alternata, nozioni e schemi - Avvolgimento dei rotori a corrente alternata, nozioni e schemi - Conduttori, Cavi, Isolamenti - Isolanti o dielettrici - Costruzione degli avvolgimenti induttori - Costruzione degli avvolgimenti indotti a corrente continua - Alternatori, costruzione degli avvolgimenti induttori - Alternatori, avvolgimento indotto - Motori asincroni, avvolgimento statorico - Motori asincroni, avvolgimento rotore - Avvolgimenti di motori a collettore, statore e rotore - Commutatori o convertitori - Metadinamo e Amplidina - Trasformatori, nuclei - Costruzione degli avvolgimenti dei trasformatori - Guasti nelle macchine a corrente continua - Guasti negli alternatori, localizzazione - Guasti nei motori a induzione, localizzazione - Difetti nei motori auto-sincroni, sincronizzati e autocompensati - Guasti nei trasformatori, localizzazione - Modifica delle caratteristiche.

— **Atlante di schemi di avvolgimento di macchine a corrente continua ed alternata.** 667 schemi originali a circuiti distinti e facilmente leggibili (di cui 85 fuori testo). 4ª ediz. aumentata e migliorata. 1958, in-8, di pag. VIII-354 . . . . **L. 3500**

Circuiti induttori di macchine a corrente continua - Avvolgimenti indotti a corrente continua - Avvolgimenti statorici a uno strato - Statori e rotori a uno strato avvolti in bifase a tre fasi - Statori e rotori avvolti in trifasi a uno strato - Avvolgimenti speciali trifasi a uno strato - Avvolgimenti embricati a doppio strato - Rotori bifasi a tre anelli avvolti a doppio strato in ondulato - Statori trifasi avvolti in embricato a due strati - Statori e rotori trifasi a contro-inserzione - Avvolgimenti statorici a due polarità - Trifasi per due polarità con avvolgimenti separati - Avvolgimenti speciali - Lavori ridotti per rotori trifasi - Lavori per rotori a contro inserzioni tipo Görges - Alcuni esempi di sdoppiamento di tensione in avvolgimenti multipolari - Avvolgimenti per trasformatori.

— **Vademecum dell'avvolgitore.** (Il Mazzocchino avvolgimenti). 4ª edizione completamente riveduta. 1963, in-16, di pag. XII-260, con 176 figure di cui 12 a colori e XXIII tabelle. Copertina a colori plastificata . . . . **L. 1800**

MORATI L., **A B C dell'elettrotecnica e della illuminazione per l'elettricista autodidatta.** 2ª edizione riveduta e aumentata. Ristampa 1963, in-16, di pagine XVI-296, con 273 illustrazioni. Copertina a colori plastificata . . . . **L. 2000**

Generalità - Corrente alternata - Trasformazione energia chimica in elettrica ed energia elettrica in chimica - Magneti e magnetismo - Generatori di corrente continua ed alternata - Motori elettrici - Allacciamento e linee di distribuzione energia elettrica in uno stabilimento - Controllo e manutenzione installazioni elettriche - Nomenclatura e terminologia elettrotecnica industriale - Luce - Illuminazione - Luminosità - Grandezze fotometriche - Calcolo rapido ILMO-K.E.S. - Valori di illuminazione.

— **Elettrofluorescenza ed elettroluminescenza.** 2ª edizione aggiornata ed ampliata con trattazioni illuminotecniche, ottiche, fisiologiche. Luce - Illuminazione - Luminosità - Occhio - Occhiali - Visibilità. Commento del prof. dott. *Nicola Raimondo.* 1962, in-8, di pag. XXXVI-432, con 119 figure, 92 tabelle, 84 tavole fuori testo. Copertina a colori plastificata . . **L. 6000**

Le radiazioni elettromagnetiche (70 ottave) - Luce - Grandezze fotometriche - Unità di misura - Elettrofluorescenza: lampade; ausiliari; schemi - Elettroluminescenza: tubi al neon; lampade al sodio, al mercurio, al gas xenon - Illuminazione industriale, commerciale, civile e stradale - Costi illuminazione - Paralleli di esercizio - Progettazione e calcoli di illuminazione - Metodo rapido ILMO-K.E.S. - Misura della luce e della visibilità - Occhio ed occhiali nel mondo del lavoro - Storia dell'illuminazione - Armonia di luce e colori - La luce bioluminescente - La luce atomica - Terminologia illuminotecnica C.I.E. con vocabolario italiano, francese, inglese, tedesco.

(segue all'interno di questo risvolto)

EDITORE ULRICO HOEPLI MIL

Prezzo del presente volum

L. 14.000
HOEPLI
MILANO